

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geologije

Primjena seizmičkih atributa u procjeni ležišnih značajki plinskog polja Katarina

Diplomski rad

Alan Turk

G 217

Zagreb, 2017.

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem svojoj mentorici Doc. dr. sc. Jasna Orešković na ukazanom povjerenju, bez čije pomoć i savjeta izrada ovog diplomskog rada ne bi bila moguća.

Velika zahvala asistentici mag. ing. geol. Nataši Balaško na strpljenju i usmjeravanju kroz cjelokupni proces interpretacije u Petrelu, te profesorici Dubravki Pleše na lektotiranju sažetka na engleskom jeziku.

Također veliko hvala djevojci Ani, noni, majci i ocu na bezuvjetnoj podršci i motivaciji.

Primjena seizmičkih atributa u procjeni ležišnih značajki plinskog polja Katarina

ALAN TURK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Ovaj diplomski rad izrađen je u računalnom programu Petrel[™] 2014, a cilj mu je određivanje ležišnih značajki plinskog polja Katarina, te seizmička interpretacija ležišta samog polja korištenjem seizmičkih atributa. U radu su interpretirana tri ležišta: PLQ-A, PLQ1-D, te PLQ1-C, te dva horizonta: Pretpliocenska diskordancija te Santerno formacija. Izrađeni su i sintetski seizmogrami za bušotine Katarina 1 i Katarina 2. Pri procjeni ležišnih značajki korišteni su seizmički atributi: *trenutna amplituda*, *trenutna frekvencija*, *trenutna faza*, *kosinus trenutne faze*, *varijanca*, *kaos* i *originalna amplituda*, koji su isto tako uvelike olakšali seizmičku interpretaciju ležišta. Također, izrađene su i strukturne karte svih interpretiranih horizonata, te su opisani strukturno-tektonski i litološki odnosi. Napravljene su i 3D atributne kocke za svaki od korištenih seizmičkih atributa, te su pri analizi njihovih horizontalnih presjeka pronađeni vrlo zanimljivi prikazi kanala oko dvostrukog vremena putovanja vala od 591 ms.

Ključne riječi: Petrel 2014, seizmički atributi, sintetski seizmogram, seizmička interpretacija, seizmički trag, atributne kocke

Diplomski rad sadrži: 56 stranica, 31 slika, 16 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Voditelj: Dr. sc. Jasna Orešković, docent

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, docent
Dr. sc. prof. Franjo Šumanovac, redoviti profesor
Dr. sc. prof. Davor Pavelić, redoviti profesor

Datum obrane: 27. rujna 2017.

Application of seismic attributes in evaluation of reservoir characteristics in the Katarina gas field

ALAN TURK

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mineralogy, Petrology and Mineral Deposits,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

This master's thesis was made using the Petrel™ 2014 computer program. The goal of the thesis was to evaluate and define reservoir characteristics of the Katarina gas field, and perform seismic interpretation of the reservoirs using seismic attributes. Three reservoirs were interpreted in this thesis: PLQ-A, PLQ1-D, as well as PLQ1-C, and two horizons: Prepliocene discontinuity and the Santerno formation. Synthetic seismograms were made for both Katarina-1 and Katarina-2 rigs. Several seismic attributes were used to evaluate reservoir characteristics: *reflection strength*, *instantaneous frequency*, *instantaneous phase*, *variance*, *chaos*, *cosine of instantaneous phase* and *original amplitude*, which made seismic interpretation much easier. Furthermore, structural maps for all the interpreted horizons were made, and structural-tectonic and lithological relations were described. Also, attribute cubes were made from all the seismic attributes used. Thorough analysis of the cubes horizontal slices showed very interesting contours of the channel on the 591 ms wave two way travel time.

Key words: Petrel 2014, seismic attributes, synthetic seismogram, seismic interpretation, seismic trace, attribute cube

Thesis contains: 56 pages, 31 features, 16 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Supervisor: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD

Reviewers: Assistant Professor Jasna Orešković, PhD
Professor Franjo Šumanovac, PhD
Professor Davor Pavelić, PhD

Date of defense: September 27th, 2017

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PLINSKO POLJE KATARINA	2
2.1 Geografski položaj	2
2.2 Povijest istraživanja	3
2.3 Geološki odnosi	5
2.3.1 Geološki odnosi šireg područja	5
2.3.2 Geološki opis polja Katarina	8
3. SINTETSKI SEIZMOGRAM	11
3.1 Trodimenzionalna seizmička mjerenja	11
3.2 Izrada sintetskog seizmograma	11
4. INTERPRETACIJA LEŽIŠTA POLJA KATARINA	18
4.1 Interpretacija seizmičkih horizonata	18
4.2 Strukturna interpretacija.....	24
5. SEIZMIČKI ATRIBUTI	30
5.1 Hilbertova transformacija seizmičkog signala.....	31
5.2 Atributi kompleksnog traga	33
5.2.1 Trenutna amplituda	33
5.2.2 Trenutna faza.....	35
5.2.3 Trenutna frekvencija	36
5.2.4 Kosinus trenutne faze	36
5.2.5 Kaos.....	37
5.2.6 Varijanca	37
5.3 Horizontalni atributni presjeci i kanal.....	46
6. ZAKLJUČAK.....	53
7. LITERATURA	54

Popis slika

Slika 2.1 Položaj plinskog polja Katarina.....	2
Slika 2.2 Miocenske i pliocensko-kvartarne depresije u Jadranskom bazenu.....	6
Slika 2.3 Tablica litostratigrafskih formacija.....	7
Slika 2.4 Litostratigrafski stup na području Jadrana.....	10
Slika 3.1 Refleksija i refrakcija na granici u slučaju kuta upada različitog od pravog.....	13
Slika 3.2 Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-1 izračunat s valićem <i>Isis-frekvencija</i>	15
Slika 3.3 Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-2 izračunat s valićem <i>Extended white</i>	17
Slika 4.1 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata.....	18
Slika 4.2. Poprečni seizmički profil 11320.....	20
Slika 4.3 Poprečni seizmički profil 11620.....	21
Slika 4.4 Uzdužni seizmički profil 1650.....	22
Slika 4.5 Uzdužni seizmički profil 2110.....	23
Slika 4.6 Strukturna karta horizonta pretpliocenska diskordancija.....	25
Slika 4.7 Strukturna karta horizonta krovina Santerno formacije.....	26
Slika 4.8 Strukturna karta horizonta PLQ-A.....	27
Slika 4.9 Strukturna karta horizonta PLQ1-D.....	28
Slika 4.10 Strukturna karta horizonta PLQ1-C.....	29
Slika 5.1 Prikaz kompleksnog seizmičkog traga.....	32
Slika 5.2 Trenutna amplituda.....	34
Slika 5.3 Grafički prikaz trenutne faze.....	35
Slika 5.4 Poprečni profil 11650 s korištenim atributom trenutne amplitude.....	38
Slika 5.5 Uzdužni profil 2100 s korištenim atributom trenutne amplitude.....	39

Slika 5.6 Poprečni profil 11640 s korištenim atributom kosinus trenutne faze.....	40
Slika 5.7 Poprečni profil 11610 s korištenim atributom trenutne frekvencija.....	41
Slika 5.8 Poprečni profil 11620 s korištenim atributom kosinus trenutne faze.....	42
Slika 5.9 Uzdužni profil 2100 s korištenim atributom kaos.....	43
Slika 5.10 Uzdužni profil 1820 s korištenim atributom varijanca.....	44
Slika 5.11 Horizontalni presjek trenutne amplitude i trenutne frekvencije za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms.....	47
Slika 5.12 Horizontalni presjek varijance i kosinusa trenutne faze za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms.....	48
Slika 5.13 Horizontalni presjeci originalne amplitude i kaosa za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms.....	49
Slika 5.14 Horizontalni presjek trenutne frekvencije na 1010 ms.....	53

1. UVOD

Diplomski rad vlastita je interpretacija plinskog ležišta Katarina, u potpunosti realizirana u programskom paketu Petrel™ 2014.

Plinsko polje Katarina smješteno je u središnjem dijelu jadranskog podmorja, uz liniju razgraničenja Hrvatske s Italijom. Istraživanje je započelo 1989. godine izradom bušotine Katarina-1, no zbog nedostatka značajnijih pojava ugljikovodika, bušotina je napuštena.

Interpretacijom 3D seizmičkih mjerenja 2000. godine potvrđeno je postojanje amplitudnih anomalija (engl. bright spot) sjeveroistočno od bušotine Katarina-1, te je odlučeno da se izradi bušotina Katarina-2 kojom bi se utvrdila prisutnost plinskih ležišta (VIDAČEK, 2005). Bušotinom Katarina-2 utvrđena je prisutnost pet plinom zasićenih ležišta PLQ1-A, PLQ1-C, PLQ1-C1, PLQ1-D i PLQ-A.

Petrel™ 2014 je računalni program tvrtke Schlumberger. Odličan je programski paket za interpretaciju seizmičkih podataka, izradu seizmičkih modela, korelaciju bušotinskih podataka, izradu seizmičkih atributa i strukturnih karata, uz još mnogo drugih primjena.

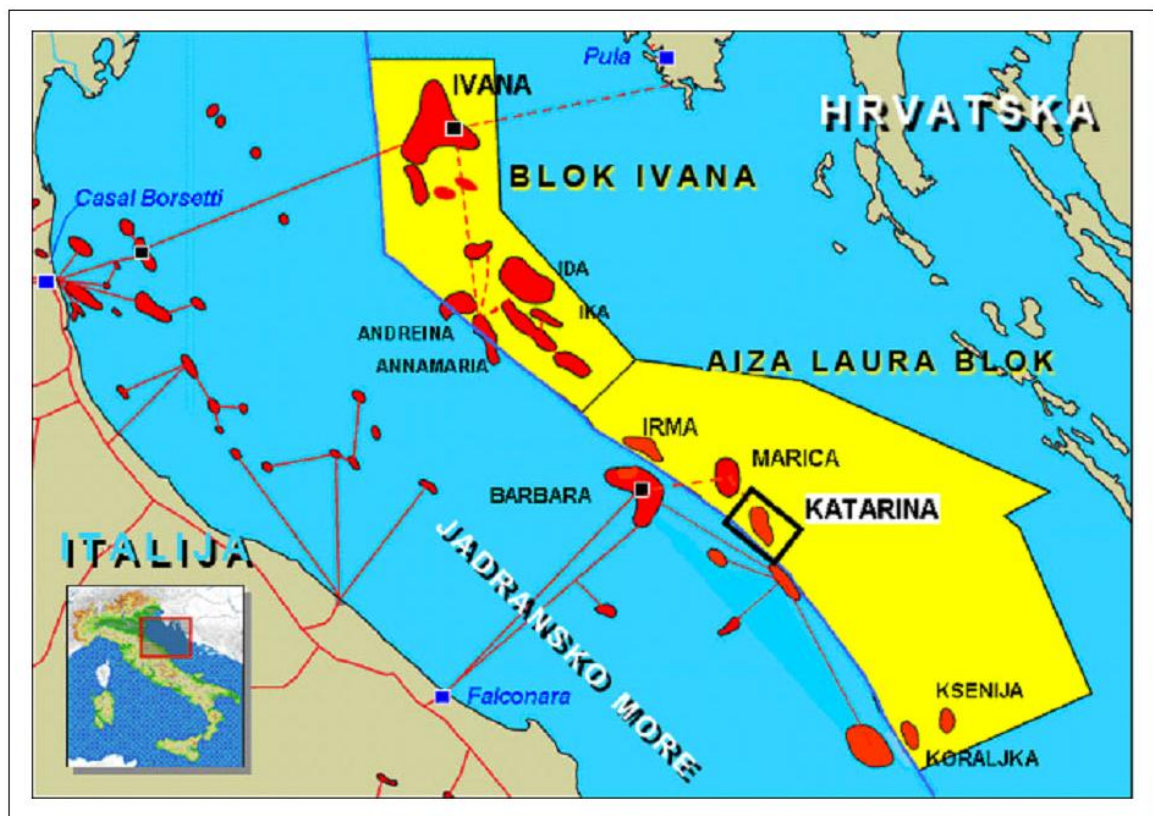
Pri početku rada u programskom paketu Petrel™ 2014 korišteni su postojeći seizmički podaci iz dviju bušotina Katarina-1 i Katarina-2. Uslijedila je izrada sintetskih seizmograma za obje bušotine, nakon čega je izvedena strukturno-tektonska, te seizmička interpretacija triju od pet plinom zasićenih ležišta i to PLQ-A, PLQ1-C te PLQ1-D. Izrađene su i atributne kocke na temelju sedam seizmičkih atributa i to trenutne amplitude, trenutne frekvencije, trenutne faze, kosinusa trenutne faze, kaosa, varijance i originalne amplitude. Potom su izrađeni horizontalni profili za svaki od tih atributa te je opisan kanal oko dvostrukog vremena putovanja vala od 591 ms.

2. PLINSKO POLJE KATARINA

2.1 Geografski položaj

Plinsko polje Katarina smješteno je u središnjem dijelu jadranskog podmorja, uz liniju razgraničenja Hrvatske s Italijom. Smješteno je unutar Aiza Laura bloka koji zauzima površinu od oko 4300 km² (CAROTENUTO, 2000), Slika 1.1.

Udaljeno je 105 km zapadno od Zadra, 66 km od talijanske obale i 10 km od plinskog polja Marica. Nalazi se unutar zajedničkog eksploatacijskog polja s plinskim poljem Maricom. Uz sjeverozapadni dio bloka nalazi se rub istarskog dijela karbonatne platforme, središnji dio je smješten na antiklinalnoj strukturi, Srednjojadranskom pragu, a jugoistočni dio u području Dugootočne depresije. Dubina mora iznosi oko 70 m, a na dnu se nalazi mulj, glina i pijesak (VIDAČEK, 2005).



Slika 2.1 Položaj plinskog polja Katarina

2.2 Povijest istraživanja

Istraživanje u hrvatskom dijelu Jadranskoga mora započelo je 1968. godine uporabom broda za marinska seizmička istraživanja „Vez“. Do danas je u tom prostoru snimljeno oko 45 000 km 2D seizmičkih profila, 6200 km² 3D seizmičkih mjerenja, te je načinjeno 135 bušotina. Prva bušotina bila je Jadran-1 izbušena pomoću francuske platforme „Neptune“ u području Dugootočne depresije 1970. godine. Uskoro, 1973. godine, otkriveno je plinsko polje Ivana bušotinom Jadran-6 i to u području sjevernog Jadrana. Ležišta su smještena u kvartarnim sedimentima istaloženim u području Padske depresije. To otkriće potaklo je nabavu tri hrvatske platforme (Panon, Zagreb i Labin) što je rezultiralo otkrićem još šest plinskih polja u tom prostoru (Ika, Ida, Annamaria, Ksenija, Koraljka i Irma) u razdoblju 1978.-1993 (MALVIĆ et al, 2011).

Plinsko polje Katarina istraženo je dubokim istražnim bušenjem 1989. godine izradom bušotine Katarina-1, obzirom da je na osnovi interpretacije 2D seizmičkih profila utvrđeno strukturno zatvaranje u sedimentima donjeg pleistocena, te više amplitudnih anomalija (engl. bright spot) u plićim naslagama. Bušotinom nisu utvrđene značajnije pojave ugljikovodika i bušotina je napuštena kao negativna (VIDAČEK, 2005). Kasnije se ispostavilo da je bušotina promašila ležišta.

U veljači 1996. stvorena je zajednička tvrtka INE (Hrvatska) i ENI-ja (Italija) za istraživanje i proizvodnju plina iz sjevernojadranskih polja (INAgip). Jedan od glavnih razloga za zajedničko ulaganje bilo je ENI-jevo veliko iskustvo u istraživanju i proizvodnji iz velikog broja polja smještenih u podmorju blizu Ravenne, tj. u sedimentima paleodelte rijeke Po, kao i postojanje sustava podmorskih i kopnenih cjevovoda na talijanskoj strani (MALVIĆ et al, 2011).

Djelatnošću tvrtke INAgip 1997. godine snimljeni su seizmički podaci u području plinskih polja na sjevernom dijelu Jadrana. Tada je otkriveno sedam novih plinskih polja među kojima je bila i Katarina.

Seizmički podaci su interpretirani 2000. godine kada je potvrđeno postojanje amplitudnih „bright spot“ anomalija sjeveroistočno od bušotine Katarina-1. Odlučeno je da se izradi bušotina Katarina-2 kojom bi se utvrdila prisutnost plinskih ležišta na koja je ukazivala 3D seizmička interpretacija (VIDAČEK, 2005).

Bušotina Katarina-2, koju je INAgip bušio u listopadu 2002. godine otkrila je nekoliko plinskih ležišta u Carola formaciji koja pripada srednjem pleistocenu na dubinama između 650 m i 1020 m. Na temelju njihovog plinskog potencijalna, definirano je pet ležišta. U dubljim eocenskim scaglia vapnencima, plin nije pronađen (NORBERG, 2006).

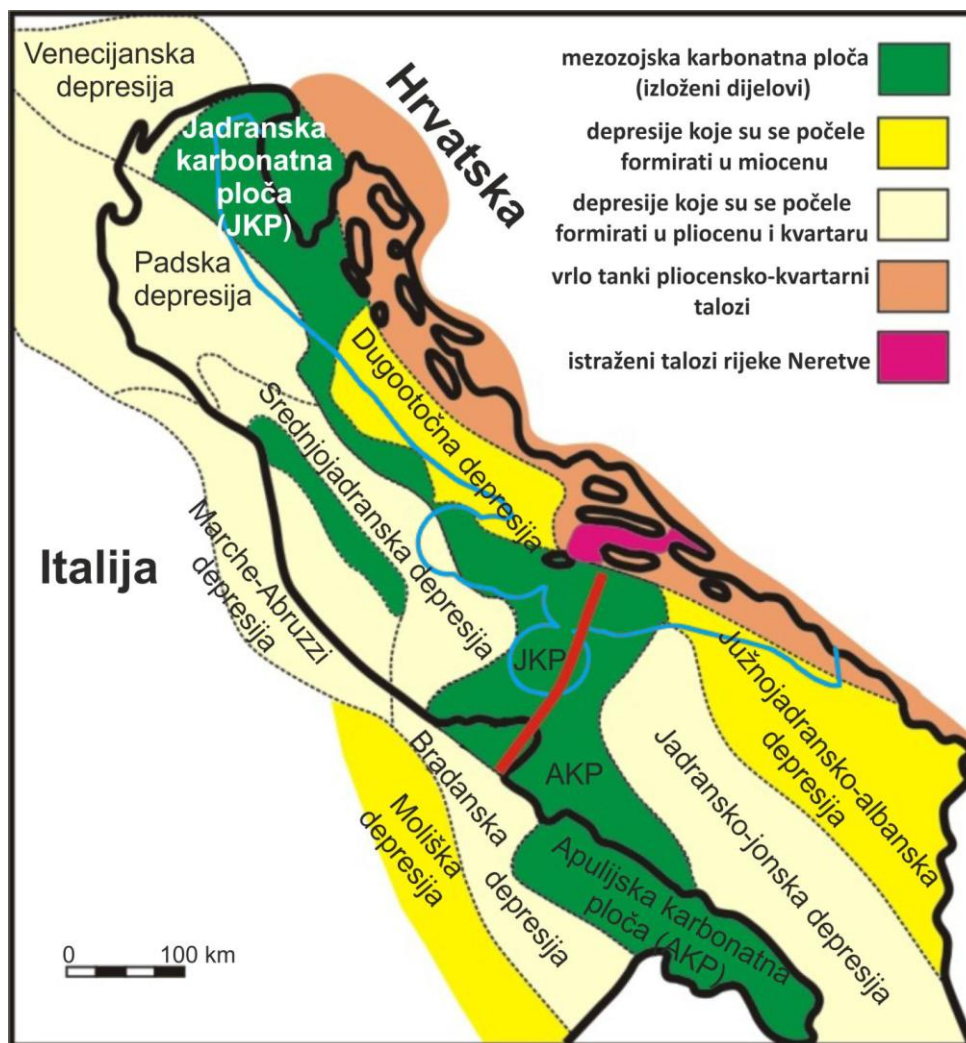
Na temelju podataka prikupljenih bušenjem i reinterpetacijom 3D seizmičkih podataka načinjena je nova procjena rezervi i plan razrade polja, te su izrađene bušotine Katarina 1dir, Katarina 2dir i Katarina 3dir.

2.3 Geološki odnosi

2.3.1 Geološki odnosi šireg područja

Tijekom geološke povijesti taložni uvjeti u jadranskom podmorju značajno su se mijenjali kao i tektonska aktivnost. Jadransko more je konačno oblikovano u holocenu nakon Flandrijske transgresije. No, naslage koje se danas nalaze u Jadranskom bazenu znatno su starije. Najstarije nabušene stijene su permske i trijaske naslage, do ladinika taložene na karbonatnoj platformi. Tijekom perma su taloženi klastiti, evaporiti i karbonati, a u starijem trijasu klastiti i karbonati. Tijekom srednjeg trijasa zabilježeni su značajni tektonski pokreti uz duboke rasjede koji su presijecali cijelu Zemljinu koru, što je uzrokovalo širenje bazena i pojavu vulkanizma. Krajem krede, prostrana se Jadranska karbonatna platforma postupno dezintegrira i izdiže (VLAHOVIĆ et al, 2005). Transgresijom u starijem paleogenu obnavlja se tek mjestimična marinska karbonatna ili slatkovodna sedimentacija. Intenziviranje izdizanja prati klastična sedimentacija koja se održala i tijekom miocena, pliocena, pleistocena i kvartara ali s različitim izvorima detritusa. U području Sjevernog Jadrana naslage paleocenske do miocenske starosti mogu se naći tek mjestimice i to uglavnom u dubljim prostorima gdje su predstavljene karbonatima. Nasuprot tomu, pliocenski, pleistocenski i kvartarni sedimenti prekrivaju cijelo područje i znatnih su debljina, a predstavljeni su laporima, glinama, siltovima, silitima, pješčenjacima i pijescima (VELIĆ et al, 2011).

Jadranski bazen podijeljen je na pojedinačne depresije, različite starosti s obzirom na početke njihova formiranja. Tako su se u miocenu oblikovale tri depresije: Dugootočna, Južnojadransko-albanska i Moliška. Kasnije, u pliocenu, spuštanjem nastaju i ostale depresije: Venecijanska, Padska, Marche-Abruzzi, Srednjojadranska, Bradanska i Jadransko-jonska. U hrvatskom dijelu Jadrana nalaze se Dugootočka depresija, istočni dijelovi Padske te Srednjojadranske i sjeverni dio Južnojadransko-albanske depresije (VELIĆ et al, 2011), Slika 2.2.



Slika 2.2 Miocenske i pliocensko-kvartarne depresije u Jadranskom bazenu (izmjenjeno prema Velić & Malvić, 2011; PRELOGOVIĆ & KRANJEC 1983)

Deltom rijeke Po određeno je sedimentacijsko područje nazvano Padskom depresijom čiji se istočni dio pruža, uglavnom jugozapadno od Istre i kvarnerskih otoka. Utjecaj rijeke Po bio je malen sve do razdoblja gornjeg pliocena kada se obalna linija Jadranskog mora počela povlačiti prema današnjim granicama, a i alpsko područje zbog izdizanja je zapremalo veću površinu negoli u donjem i srednjem pliocenu (VELIĆ et al, 2011). To je razlog zašto je pliocen u hrvatskom dijelu uglavnom predstavljen hemipelagičkim glinama i siltovima (formacija Istra), koji vrlo lako mogu biti prepoznati na najjugoistočnijim hrvatskim plinskim poljima poput Katarine i Marice (MALVIĆ, 2011), Slika 2.3.

Kronostratigrafske jedinice	Litostratigrafske formacije	
	Hrvatski naziv	Talijanski naziv
Holocen	Ivana	Ravenna
Pleistocen		Carola
Pliocen	Istra	Porto Garibaldi
		Corsini (exclusive in Italian part)
		Canopo (exclusive in Italian part)
		Santerno
Miocen	Susak	Clara
		Corinna
		Schlier
		Cavanella B
		Bisciaro
		Cavanella A
		Scaglia Cinerea
Oligocen		Scaglia
Eocen (Paleocen?)		
Mezozoik	Dinaridi	Calcarei Del Cellina

Slika 2.3 Tablica litostratigrafskih formacija (VELIC et al, 2011)

Istražno područje smješteno je u bloku Aiza-Laura koje se nalazi na područjima Dugootočne depresije i Srednjejadranskog praga. U bloku je bilo prisutno dinaridsko boranje i rasjedanje koje uključuju naslage od platformnih do baznih karbonata. Debljinom i rasprostranjenošću ističu se pleistocenske te naslage starijeg miocena. Iako plinonosne, pliocenske naslage su tanke, te su različitog litofacijesa. U donjem pliocenu utvrđeni su laporoviti siltiti, glinoviti lapori i kalcitični pješčenjaci, a u srednjem pliocenu gline i lapori s proslojcima pješčenjaka. U dubljim dijelovima nalaze se lapori, laporoviti siltiti starijeg miocena s proslojcima pjeskovitih vapnenaca i pješčenjaka, dok su ispod njih transgresivne naslage oligocena (CAROTENUTO et al., 2000).

Aiza Laurea blok se za vrijeme perma i ranog trijasa nalazio u zoni ekstenzije koja se kasnije razvila u Apulijsku pasivnu granicu Afričke ploče, i to njezinog sjevernog ruba. Opisano je sedam faza nastanka samog bloka od trijasa do danas. Prvo faza vezana je za razdoblje od gornjeg trijasa do donje jure te karakterizira fazu kontinentalnog riftinga. Druga faza, od srednjeg trijasa do krede je faza pasivnog ruba, a karakterizira je razvitak dinarske karbonatne platforme. Faza ekstenzijske tektonike koja slijedi protezala se kroz

kredu, kada se razvijaju male depresije unutar dinaridske karbonatne platforme. Početak faze kompresijske tektonike smješten u gornju kedu, vezan je uz emerziju na velikom području dinaridske platforme. U idućoj fazi u oligocenu dolazi do stvaranja bora i navlačnih struktura. U mesinijanu se razvija erozijska faza, nakon koje slijedi faza rampe koja napreduje prema zapadu u razdoblju plio-pleistocena, koja je povezana s vanjskim dijelom apeninskih navlaka. U slijedećoj fazi dubokomorski turbiditi ispunjavaju jadranski bazen. U razdoblju od srednjeg pleistocena do holocena razvija se obalni padinski progradacijski kompleks (CAROTENUTO et al, 2000).

2.3.2 Geološki opis polja Katarina

Struktura plinskog polja Katarina ima oblik izdužene antiklinale (izdignuća) pružanja sjever sjeverozapad – jug jugoistok. Antiklinalna nadsvođenja posljedica su povremenih kompresijskih naprezanja (pleistocensko-kvartarne starosti), prilikom čega je dolazilo do blagog boranja sedimenata formacije Carola (formacija Ivana na hrv.), a manjim dijelom su posljedica taloženja mlađih naslaga na paleouzdignućima pretpliocenske starosti (struktura uzrokovana podlogom), kao i diferencijalne kompakcije sedimenata uvjetovane veličinom zrna klastita. Sva ležišta plina nalaze se u Carola formaciji (donji do srednji pleistocen) u nekonsolidiranim do slabokonsolidiranim turbiditnim pješčenjacima koji se izmjenjuju sa šejlovima. Šejlovi predstavljaju matične stijene za plin i ujedno su izolatorske stijene (VIDAČEK, 2005)

Najstarije naslage utvrđene u širem prostoru plinskog polja Katarina su srednje do gornjo eocenski vapnenci (Scaglia formacija). Taložine srednjeg do gornjeg pliocena diskordantno naliježu na gornjoeocenske vapnence (Santerno formacija; Istra formacija na hrv.), a sastoji se pretežno od glinovitih lapora. Pleistocen je predstavljen izmjenom slabo vezanog kvarctinječastog pješčenjaka s tankim interkalacijama glina. Formacije koje se nalaze u okviru pleistocena su Carola formacija (donji do srednji pleistocen) i Ravenna formacija koja pripada gornjem pleistocenu (formacija Ivana na hrv.), Slika 2.5.

Tijekom donjeg pleistocena dolazi do promjene sedimentacijskih okoliša iz predbazenskih u bazenske, što je potvrđeno tankoslojevitim turbiditnim sedimentima unutar Carola formacije, koji su prekriveni bazenskim turbiditnim lobovima. U mlađem dijelu sedimentacijskog ciklusa postupan je prijelaz u deltne sedimentacijske uvjete. Donji

dijelovi ove jedinice karakterizirani su brзом progradacijom prodeltnih tijela (NORBERG, 2006). Unutar tih tijela otkriven je veliki kanal. Unutar formacije Ravenna također su otkriveni kanali, koji bi mogli biti uzrokovani djelovanjem rijeke Po. Ovo potvrđuju 3D seizmički podaci, na kojima se jasno vidi pružanje kanala, a kanal bi mogao biti dio deltne ravnice rijeke Po (ŠUMANOVAC, 2010).

Navedeni tipovi sedimenata generalno su nastali sedimentacijom u taložnom okolišu srednjeg do vanjskog šelfa osim formacije Ravenna koja je nastala u deltnim uvjetima.

Plinska ležišta polja Katarina formirana su u vršnom dijelu strukture i većim dijelom se vertikalno prekrivaju. Rasjedna tektonika na području strukture Katarina nije registrirana (iako će u ovom radu biti opisan set reverznih rasjeda) (VIDAČEK, 2005).

Česte promjene litofacijesa unutar člana posljedica su taloženja u proksimalnog dijelu lepeze, gdje pjeskoviti detritus preteže kanalnih ispuna. Taloženje se najvećim dijelom odvijalo iz vrlo gustih turbidita te povremeno debritnih i muljnih tokova. Kako se ono nastavljalo cijeli, prostor je oplićavao što se može pratiti u sedimentima, koji u najmlađem dijelu potječu iz podmorske rampe na koju je detritus donasan deltom. Podrijetlo materijala su Venecijanska i Padska depresija, a detaljnije je o tome pisao MALVIĆ et al. (2015).

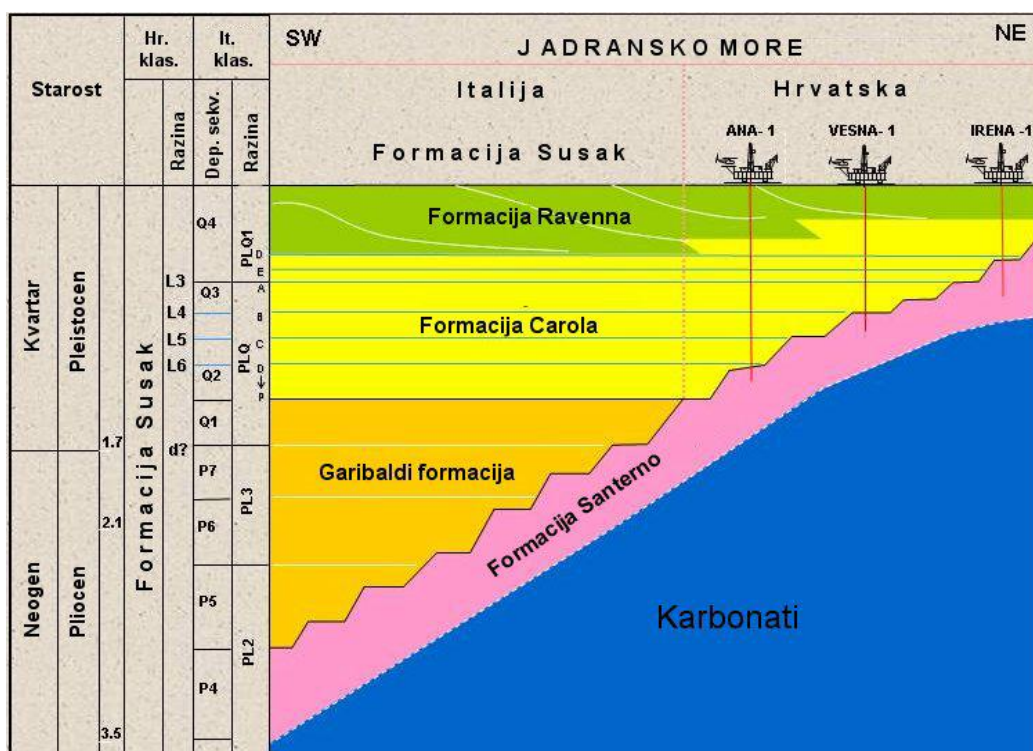
Na plinskom polju Katarina utvrđeno je postojanje strukturnih zamki (ležišta PLQ-A, PLQ1-C, PLQ1-C1 i PLQ1-D) i strukturno-stratigrafske zamke u ležištu PLQ1-A. Kombinirana strukturno-stratigrafska zamka nastala je erodiranjem pješćanih horizonata distribucijskim kanalom također pleistocenske starosti. Ležišta PLQ1-A, PLQ1-C i PLQ1-C1 homogenijeg su razvoja, dok su ležišta PLQ1-D i PLQ-A heterogenog sastava.

Ležišta plinskog polja Katarina predstavljena su facijesom pješćanih turbiditnih sedimenata. Izgrađena su od slabo konsolidiranih pješćenjaka, siltoznih pješćenjaka i silita djelomično proslojenih glinama, laporima i glinovitim laporima. (VIDAČEK, 2005).

Mineralni sastav ležišnih stijena sačinjavaju uglavnom kvarc, muskovit i ilit, te tragovi pirita. Također su uočene pojave lignita i mikrofosila.

Ležišne su stijene karakterizirane primarnom intergranularnom šupljikavošću u rasponu od 20 - 33 %. Granice ležišta utvrđene su na temelju karata amplitudnih anomalija kojima je bilo moguće razlikovati dio ležišta zasićen plinom od dijela ležišta zasićenog vodom, interpretacijom karotažnih mjerenja, te rezultatima FMT mjerenja. (VIDAČEK, 2005).

Plin je biogenog podrijetla, sastavljen uglavnom od metana (98 %), dušika (oko 1 %) i ugljikovog dioksida (manje od 1 %). Ležišne su stijene karakterizirane primarnom intergranularnom šupljikavošću u rasponu od 20 do 33 %. Propusnost svih ležišta je procijenjena na temelju rezultata testiranja ležišta PLQ1-A i PLQ-A u bušotini Katarini 2. Propusnost je izračunana iz NMR-mjerenja u bušotini Katarini 2, a vrijednosti su značajno podcijenjene u svim plinonosnim zonama zbog vrlo jakog djelovanja plina (VIDAČEK, 2005)



Slika 2.4 Litostratigrafski stup na području Jadrana

3. SINTETSKI SEIZMOGRAM

3.1 Trodimenzionalna seizmička mjerenja

Kao uneseni seizmički podaci za izradu ovog rada korišteni su već postojeći seizmički podaci ležišta Katarina. Njihova baza potječe još iz 1998. godine, kada je ENI-Agip obradio 3D seizmičke podatke bloka Aiza Laura snimane u dva navrata. U prvom je snimljeno 2600 km², a u drugom 1700 km² seizmike (CHIRI et al., 1997). Snimanje seizmičkih podataka obavljalo se po profilima kao 2D ili 3D-seizmička mjerenja. Izvor i prijamnici se kod 2D mjerenja nalaze na liniji snimanja dok je kod 3D linija prijemnika okomita na liniju izvora energije. Općenito, kao izvori energije koriste se vibrator, dinamit te vođeni topovi. Geofoni ili hidrofoni služe kao prijamnici. Reflektirani signal dolazi od reflektora do geofona i snima se u digitalnom obliku, a odziv se odnosi na zajedničku dubinsku točku (eng. *Common Depth Point*), odnosno, zajedničku refleksijsku točku (eng. *Common Reflection Point*) na samom reflektoru, dok je projekcija točke na površini zajednička središnja točka (eng. *Common Midd Point*). To je dakle točka na polovici razmaka između točke paljenja i geofona. Budući da položaj zajedničke dubinske točke zbog zakona refleksije i kosine reflektora, nije uvijek na polovici između dvije točke paljenja, u obradi se koristi CMP kao zajednička točka na površini (ŠUMANOVAC, 2007).

3.2 Izrada sintetskog seizmograma

Sintetski seizmogram je izračunata seizmička sekcija za zadani geološki model podzemlja. Samo seizmičko modeliranje ili izrada sintetskog seizmograma može biti jednodimenzionalno (1D), dvodimenzionalno (2D) i trodimenzionalno (3D), no pod pojmom sintetski seizmogram ponajčešće se misli na 1D-seizmičko modeliranje. Početna pretpostavka je kako je seizmički trag zbroj svih refleksa s pojedinih granica u podzemlju, a seizmički val reflektiran na granici ima isti oblik kao ulazni val. Akustičnom impedancijom opisana su svojstva svakoga sloja, a računa se množenjem gustoće i brzine rasprostiranja seizmičkih valova. Obzirom da su brzina i gustoća veličine ovisne jedna o drugoj, kako bi se pojednostavnio princip može se promatrati samo brzina, obzirom da su promjene brzina u stijeni izraženije od promjena gustoće. Ukoliko P-val upada na granicu

u podzemlju pod kutom koji nije pravi, njegovim lomom i odbijanjem nastaju četiri valne zrake (2 S-vala i 2 P-vala), no ukoliko je upad P-vala okomit na granicu, ne nastaju S-valovi (slika 3.1). Dio P-vala jednostavno prolazi granicu, nema loma. Upravo zbog toga se u 1D sintetskom seizmogramu uzimaju okomiti upadi vala na granicu, vodoravne granice i homogeni slojevi.

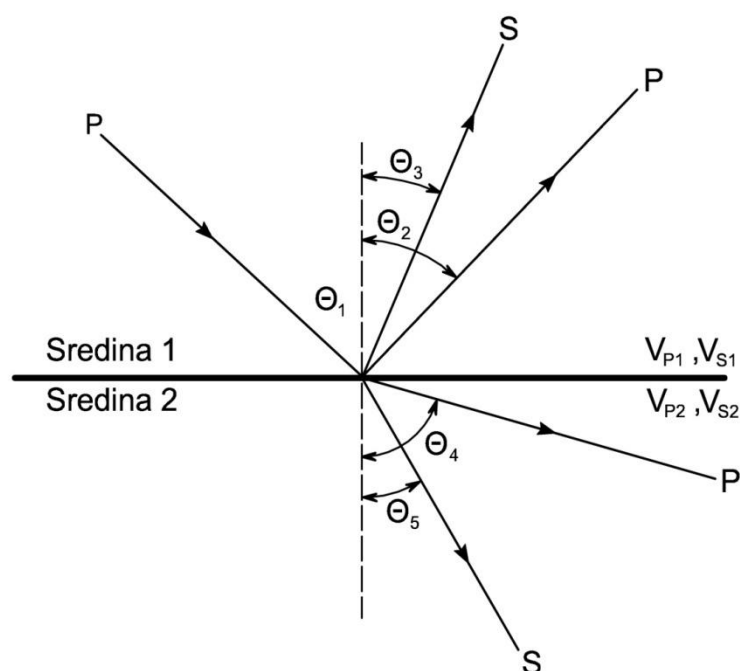
Ako razmatramo podzemlje sa aspekta većeg broja slojeva, te da svaki ima svoju akustičnu impedanciju Z , onda je koeficijent refleksije R_n na n -toj granici jednak:

$$R_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (3-1)$$

gdje su Z_n i Z_{n+1} akustične impedancije iznad i ispod granice. Akustična impedancija predstavlja umnožak gustoće stijena (ρ) i brzine P-valova (v).

$$Z = \rho v \quad (3-2)$$

Obzirom da se seizmičke brzine mijenjaju u rasponu od $\pm 50\%$, gustoće u rasponu od $\pm 20\%$, očito je da imaju puno veći utjecaj na koeficijent refleksije. Vrlo jaki refleksi mogu se uočiti na granicama s velikim razlikama brzina. Kada dublja sredina ima veću brzinu, koeficijent refleksije će biti pozitivan. Kada dublja sredina ima manju brzinu, koef. refleksije će biti negativan, te će doći do promjene faza.



Slika 3.1 Refleksija i refrakcija na granici dviju sredina u slučaju kuta upada različitog od pravog

Pojedinačni refleks s granice dobiva se množenjem koeficijenta refleksije granice s ulaznim valićem (eng. Wavelet). Zbrajanjem svih refleksa s pojedinačnih granica, dobiva se sintetski seizmogram. Karotažna mjerenja u bušotini daju nam ulazne podatke za izradu sintetskih seizmograma, zvučna karotaža daje brzinu, a gama-gama karotaža gustoću.

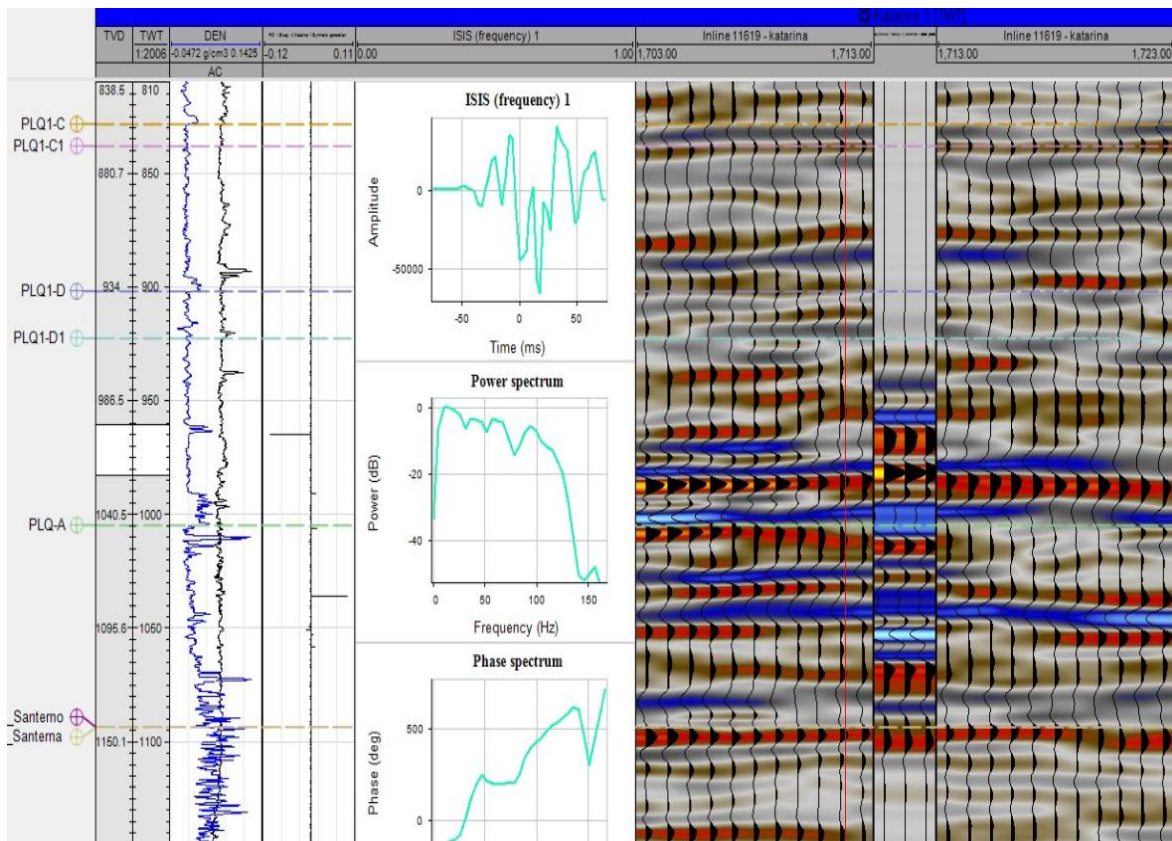
Sintetski seizmogram najviše nam služi za povezivanje seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu i bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu, odnosno kako bi se refleksima na seizmičkom profilu pridružile litološke i stratigrafske granice određene u bušotini, koje se dalje prate na seizmičkim profilima. Također je bitan i za odvajanje višestrukih refleksa, te određivanje promjena polariteta i pomaka faza što upućuje na litološke promjene (ŠUMANOVAC, 2012).

Iako postoji mogućnost izrade sintetskog seizmograma bez raspolaganja podacima o gustoći, koji se mogu izračunati korištenjem Gardnerovog zakona koji povezuje seizmičke brzine i gustoće stijena (GARDNER et al, 1974), sintetski seizmogrami u ovom radu izrađeni su samo za bušotine za koje su postojali dostupni podaci i seizmičkih brzina i gustoće (Katarina-1 i Katarina-2).

Prvi korak pri izradi bila je kalibracija karotažnih krivulja s mjerenim zakonom brzina. Zatim se birao valić za proces konvolucije. Program nudi mogućnost izbora valića po nekoliko različitih metoda poput determinističke, statističke i analitičke, a sklopu izrade sintetskih seizmograma izvedena je izrada seizmograma sa svakim od ponuđenih valića.

Na slici 3.2 prikazan je sintetski seizmogram bušotine Katarina-1. Odabrana je deterministička metoda i *Isis frequency* kao ulazni valić za koji je korišten vremenski prozor ekstrahiranja (eng. *Bulk time*) od 98 ms, kako bi se poravnao sintetski seizmogram s površinskim seizmičkim podacima. Označeni su krovina ležišta formacije Santerno, te krovine ležišta PLQ-A, PLQ1-D, PLQ1-D1, PLQ1-C i PLQ1-C1. U dubljim dijelovima primjetno je dobro podudaranje sintetskog seizmograma s površinskim seizmičkim podacima, dok u plićim dijelovima dolazi do primjetnih odstupanja kod nekih refleksa. Najbolje poklapanje vidljivo je za horizonte Santerno, te PLQ-A, dok je za PLQ1-D, amplituda refleksa slaba ali uočljiva. Poklapanje za pliće horizonte PLQ1-D1, PLQ1-C1, te PLQ1-C vrlo je loše, a sam refleks je neprimjetan.

Može se reći da je na bušotini Katarina-1 dobiveno slabo podudaranje sintetskog seizmograma i površinskih seizmičkih podataka. Korištenjem determinističke metode te valića *Prošireni bijeli* (eng. *Extended White*) dobiveno je poprilično dobro podudaranje za dublje horizonte, no podudaranje u manjim dubinama je lošije. Korištenjem valića *Isis-frekvencija* opisanog na slici 3.2 dobivena su najbolja podudaranja. Valić *Isis-vrijeme* dao je poprilično loša podudaranja za sve horizonte. Što se tiče statističke metode izrađeni su sintetski seizmogrami za oba tipa valića, a podudaranja za oba valića nisu bila zadovoljavajuća. Analitička metoda nudila je korištenje *Rickerovog*, *Butterworth*, *Klauderovog* te *Ormsby* valića.



Slika 3.2 Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-1 izračunat valićem *Isis-frekvencija*

Rickerov valić koristio se sa frekvencijom od 50 Hz te je dao dobra podudaranja na dubljim horizontima (formacija Santerno i krovina PLQ-A), dok su podudaranja na plićim horizontima vrlo slaba. *Butterworth* valić dao je vrlo sličan izgled sintetskog seizmograma kao i *Ormsby* valić, te su oba sintetska seizmograma imala još slabija podudaranja od modela izrađenog *Rickerovim* valićem. Kada se kao ulazni valić koristi *Klauderov* valić, sintetski seizmogram bio je podudarniji s površinskim seizmičkim podacima od prethodna dva, no još uvijek je podudaranje kako u plićim, tako i u dubljim horizontima bilo nezadovoljavajuće.

Pri korištenju metode višestrukog valića, te valića *Wavelet average* (po Rickeru) podudaranje u dubljim horizontima (formacija Santerno i krovina PLQ-A) bilo je dosta dobro, dok su kod plićih horizonata, vrlo slično kao i kod analitičke metode i *Rickerovog* valića, podudaranja bila slaba.

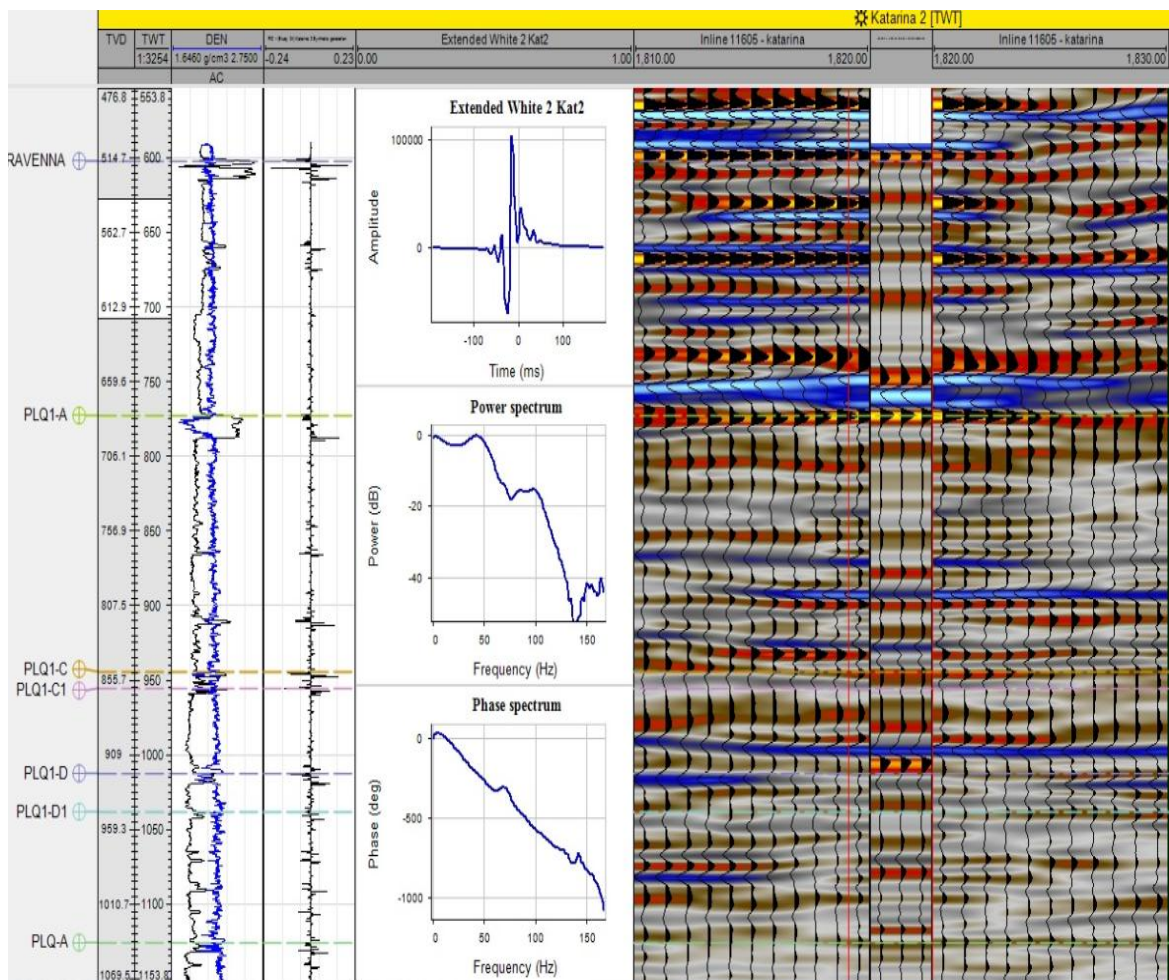
U bušotini Katarina-2 također su napravljeni sintetski seizmogrami za sve metode i sve ponuđene valice. Podudaranje sintetskog seizmograma i površinskih seizmičkih podataka znatno je bolje nego za bušotinu Katarina-1.

Slikom 3.3 prikazan je sintetski seizmogram bušotine Katarina-2 pri čemu je korištena deterministička metoda a ulazni valić je bio *Prošireni bijeli* valić, kod kojeg je korišten vremenski prozor ekstrahiranja od 80 ms. Sintetski seizmogram se odlično podudara s površinskim seizmičkim podacima za pliće horizonte, te je refleksu vrlo lako pratiti. Za horizonte Ravenna te PLQ1-A gdje su prisutne i dvije najpliće bijele mrlje, poklapanje je odlično. Horizonti PLQ1-C, PLQ1-C1, te PLQ1-D i PLQ1-D1 nešto se slabije poklapaju, odnosno javljaju se odstupanja u položaju refleksa a razlog tome mogle bi biti standardne pogreške u okviru karotažnih mjerenja, ali i sjena koju pliće mrlje stvaraju na mjerenim seizmičkim profilima što je opisano u Šumanovac (2010).

Horizonte ispod PLQ1-D1 gotovo je nemoguće popratiti jer je refleks praktički neprimjetan, što bi također moglo biti uzrokovano bijelim mrljama prisutnim u plićim horizontima.

Bitno je napomenuti da je bilo potrebno korelirati sintetski seizmogram po dubini te je korišten vremenski prozor ekstrahiranja od 55 ms kako bi se seizmogram poravnao s odgovarajućim refleksima na površinskim seizmičkim podacima te kako bi bilo moguće napraviti korelaciju.

Od ostalih isprobanih metoda i valića pri izračunu sintetskog seizmograma za bušotinu Katarina-2, dobra podudaranja su uočena za ulazni valić *Isis-frekvencija*, posebno kod plićih horizonata, no kod dubljih horizonata je bilo teško pratiti refleks. Statistička metoda je također dala dosta dobre rezultate za pliće horizonte, no dublje je bilo teško pratiti. Slična situacija ponovila se i kod izračuna s *Rickerovim* valićem frekvencije 27 Hz.



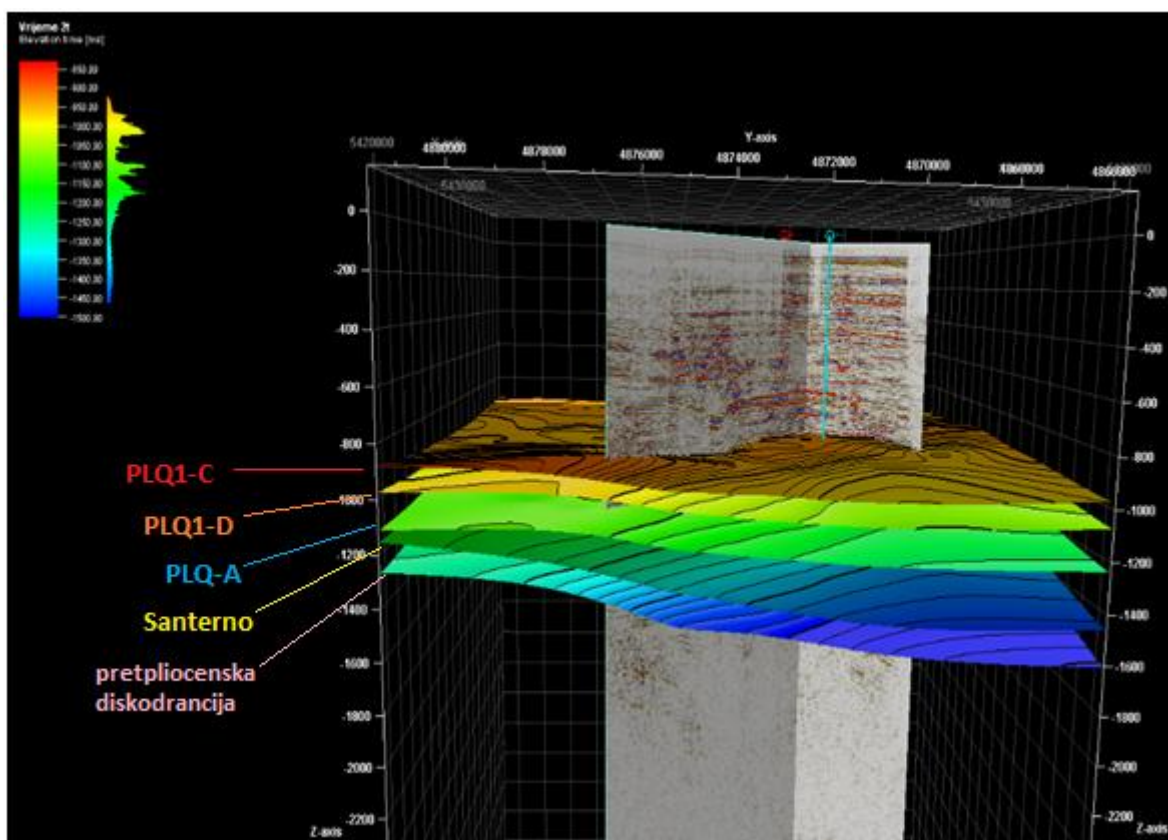
Slika 3.3 Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina-2 izračunat s valićem *Extended white*

4. INTERPRETACIJA LEŽIŠTA POLJA KATARINA

4.1 Interpretacija seizmičkih horizonata

Interpretacija seizmičkih podataka izrađena je u računalnom programu Petrel™ 2014. Pomoću sintetskih seizmogram podaci u vremenskom mjerilu povezani su s bušotinskim podacima u dubinskom mjerilu.

Nakon toga interpretirani su seizmički horizonti i to njih pet (PLQ1-C, PLQ1-D, PLQ-A, formacija Santerno i pretpliocenska diskordancija) od kojih su tri krovine ležišta (PLQ1-C, PLQ1-D i PLQ-A) (slika 4.1). Interpretacija je rađena u potpunosti ručno zbog toga što je vođeno praćenje refleksa (eng. *Guided 2D*) i automatsko praćenje (eng. *3D Autotracking*) često zakazivalo, radi diskontinuiranost seizmičkih refleksa. Interpretacija je provedena na svakom 10-om poprečnom (eng. *Inline*) i uzdužnom (eng. *XLine*) profilu.



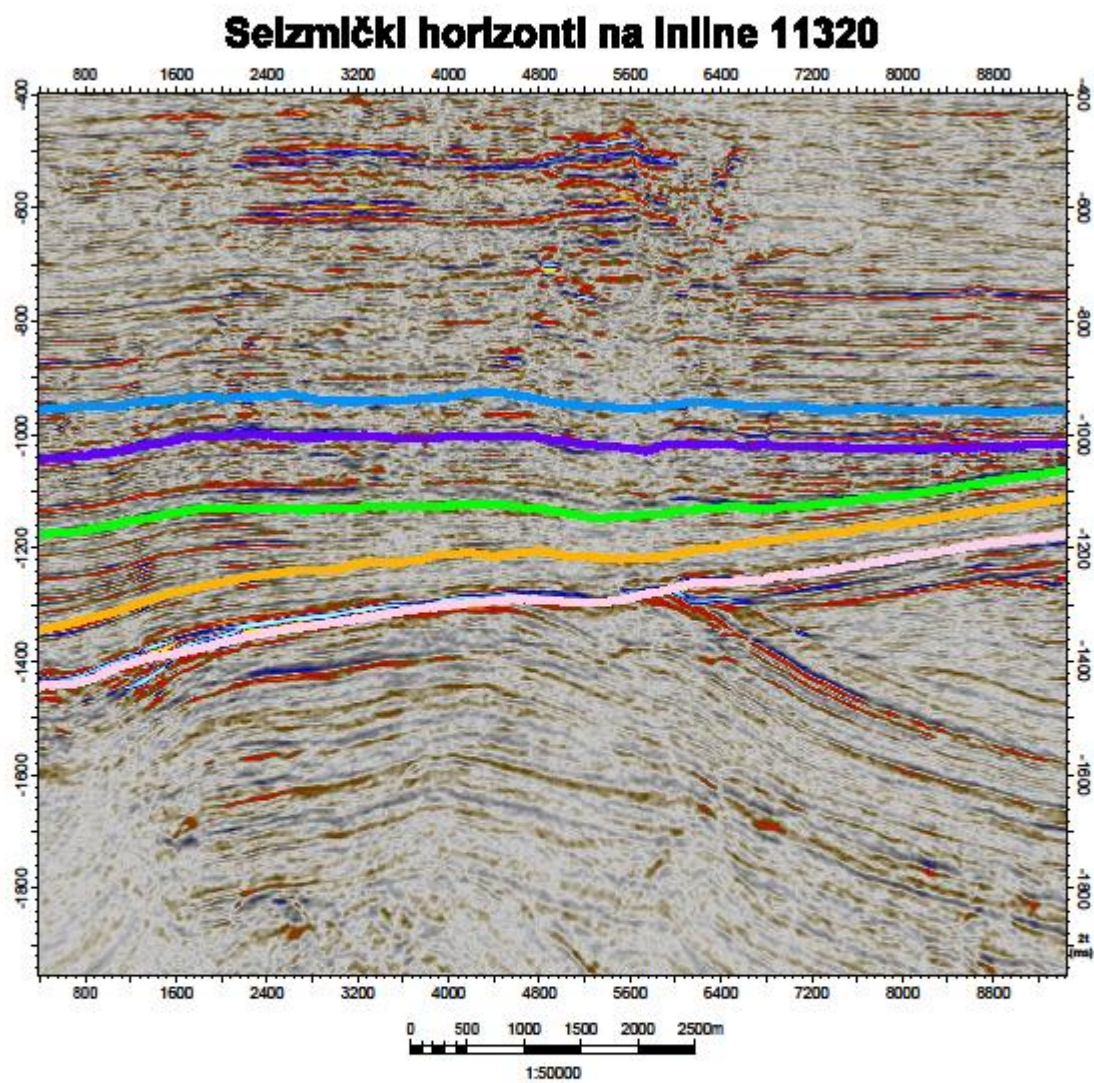
Slika 4.1 Trodimenzionalni prikaz interpretiranih horizonata

Ležišta plinskog polja Katarina predstavljena su facijesom pješćanih turbiditnih sedimenata. Izgrađena su od slabo konsolidiranih pješćenjaka, siltoznih pješćenjaka i silita djelomično proslojenih glinama, laporima i glinovitim laporima (VIDAČEK, 2005).

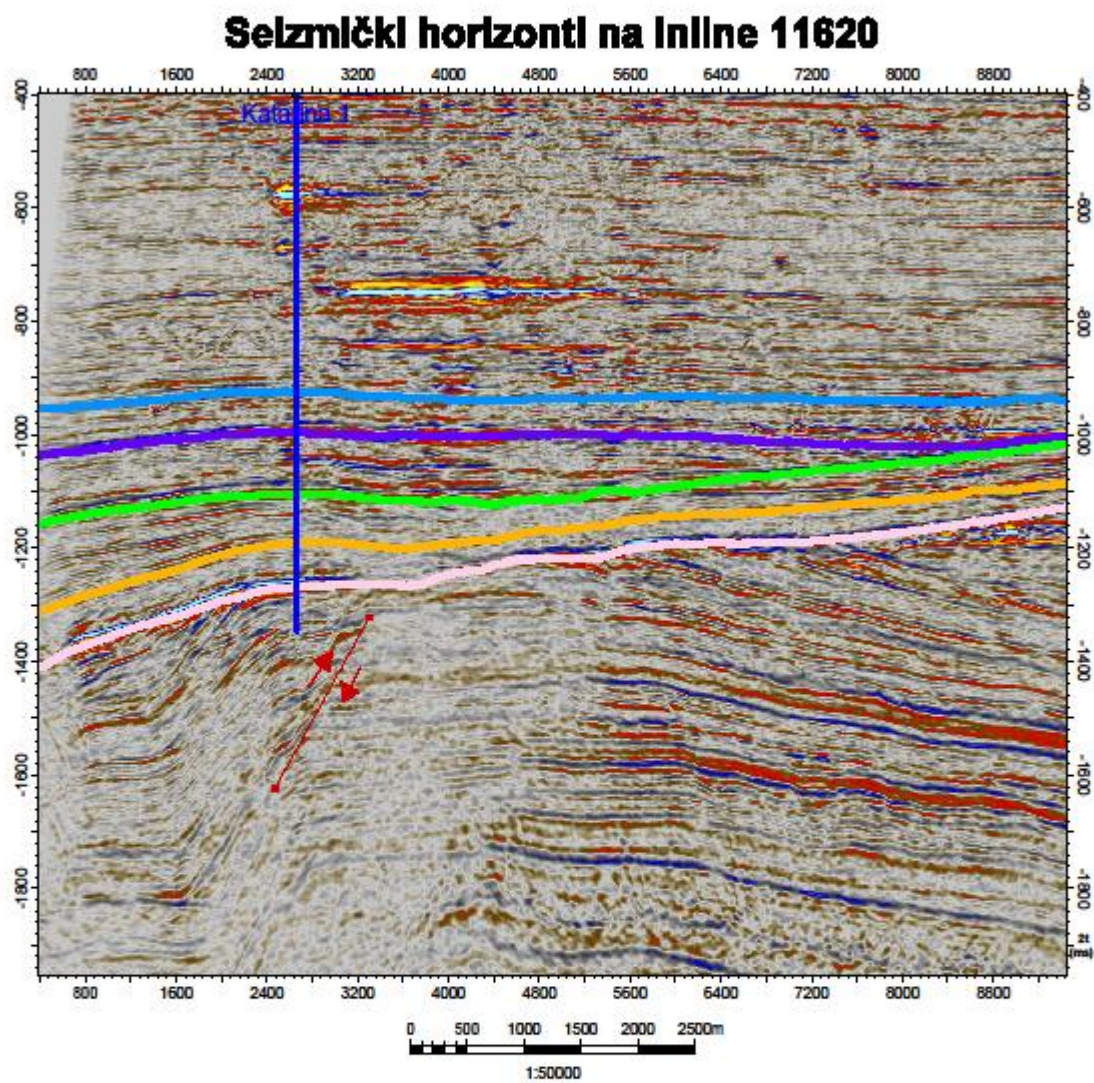
Krovina ležište PLQ1-C utvrđeno je na dubini 850 m, odnosno u dvostrukom vremenu putovanja vala od 944 ms. Krovina ležište PLQ1-D utvrđena je na dubini od 924 m, odnosno na 1010 ms, a krovina ležišta PLQ-A na 1039 m ili na 1129 ms. Ležište PLQ-A je heterogene građe sastavljeno od više pješćanih slojeva međusobno odijeljenih proslojcima lapora, dok je krovina formacije Santerna interpretiran kao podina kvartarnih turbidita, ili krovina plio-pleistocenskih šejlova na koju isključuju turbiditi (VIDAČEK, 2005). Krovina formacije Santerno je utvrđena na dubini od 1116 m ili 1201 ms. Dublje od nje nalazi se pretpliocenska diskordancija koju karakterizira kontakt eocenskih Scaglia vapnenaca i šejlova, a dubina je na 1198 m ili 1266 ms.

Interpretacija je u PetreluTM 2014 provedena na svakom 10-om poprečnom (Inline 11300-11900), te uzdužnom (XLine 1300-2200) profilu. Gotovo na svakom od odabranih vertikalnih profila uočavaju se povijanja slojeva zbog bijelih mrlja odnosno stijena zasićenih plinom (više u poglavlju 5.3). Na slici 4.2 vidi se izmjena polariteta refleksa između 200-400 ms što je tipično za bijelu mrlju. Ispod bijelih mrlja vidljiv je trend povijanja horizonata zbog smanjenja seizmičkih brzina. Poprečni seizmički profil 11620 prolazi, bušotinom Katarina-1, te se vidi interpretirani reversni rasjed (slika 4.3). Također se javlja bijela mrlja na oko 700 ms, ali ispod nje ne dolazi do povijanja horizonata, odnosno bijela mrlja nema utjecaja na horizonte.

Na uzdužnim seizmičkim profilima, izraženije je povijanje horizonata ispod bijelih mrlja nego na poprečnim profilima. Na uzdužnom seizmičkom profilu 1650 vidljiva je bijela mrlja na 500 ms (slika 4.4). Horizonti povijaju sve do najdubljeg odnosno pretpliocenske diskordancije.

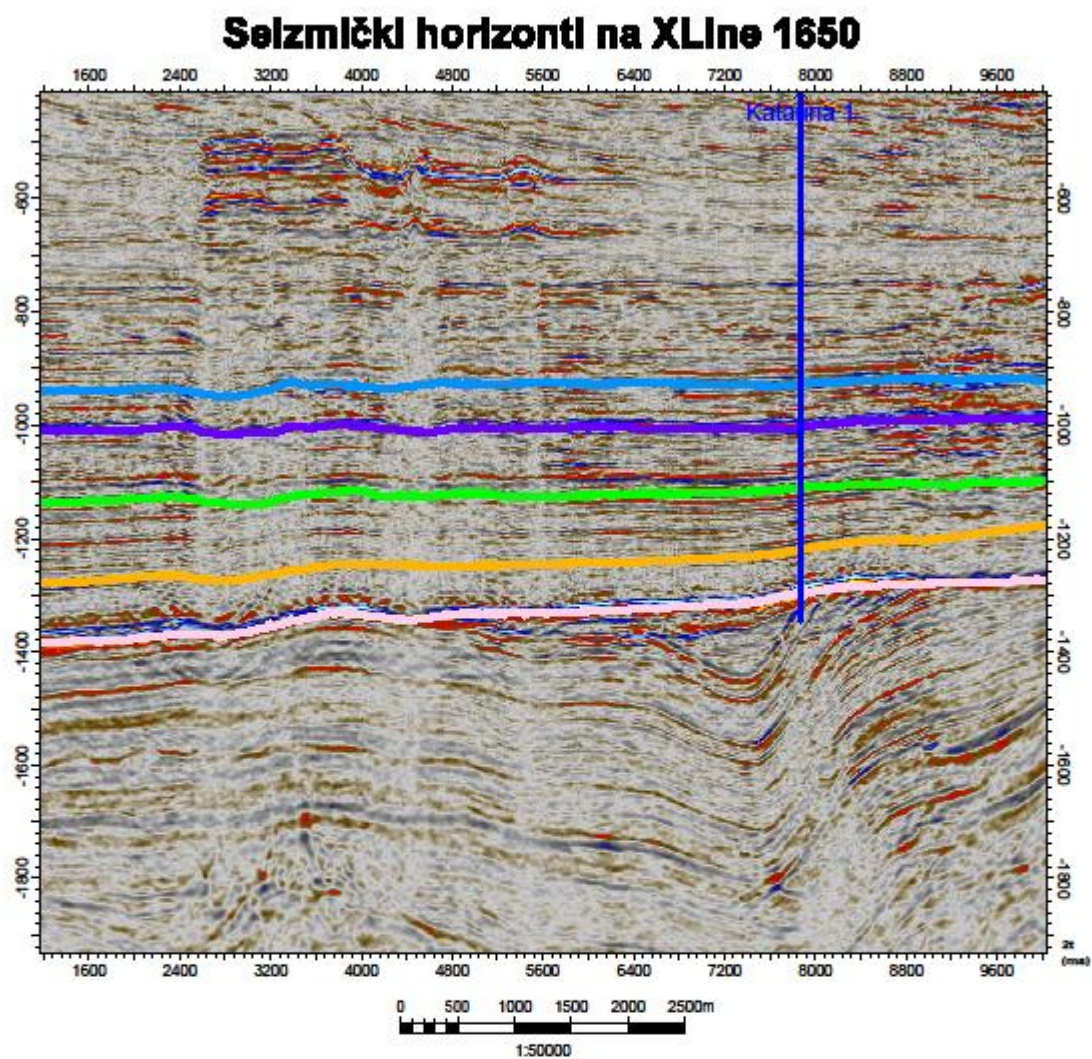


Slika 4.2. Poprečni seizmički profil 11320



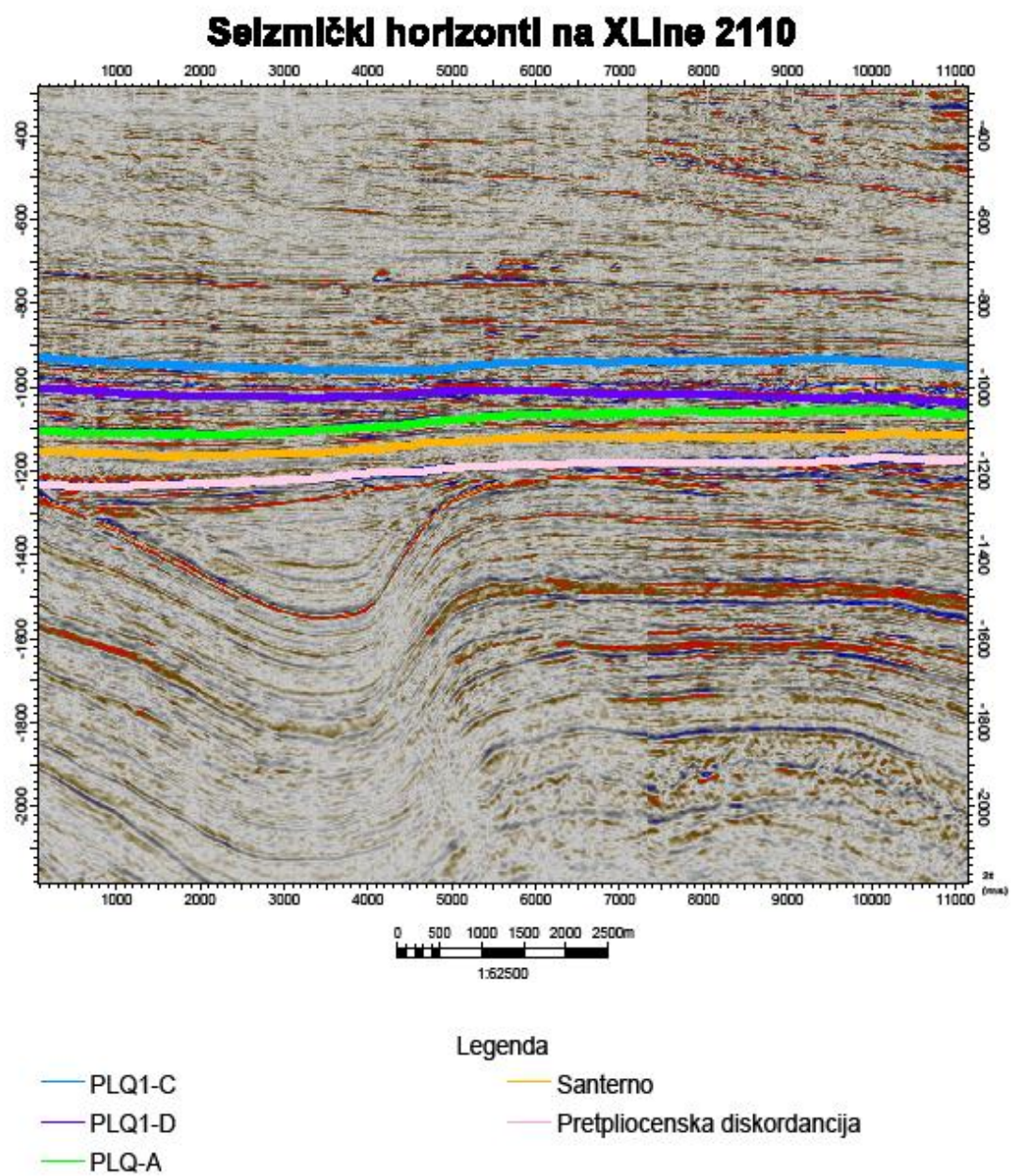
- Legenda**
- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| — Reversni rasjed | — Santerno |
| — PLQ1-C | — Pretpliocenska diskordancija |
| — PLQ1-D | — Katarina 1 |
| — PLQ-A | |

Slika 4.3 Poprečni seizmički profil 11620



- Legenda**
- | | |
|----------|-------------------------------|
| — PLQ1-C | — Santerno |
| — PLQ1-D | — Prepliocenska diskordancija |
| — PLQ-A | — Katarina 1 |

Slika 4.4 Uzdužni seizmički profil 1650



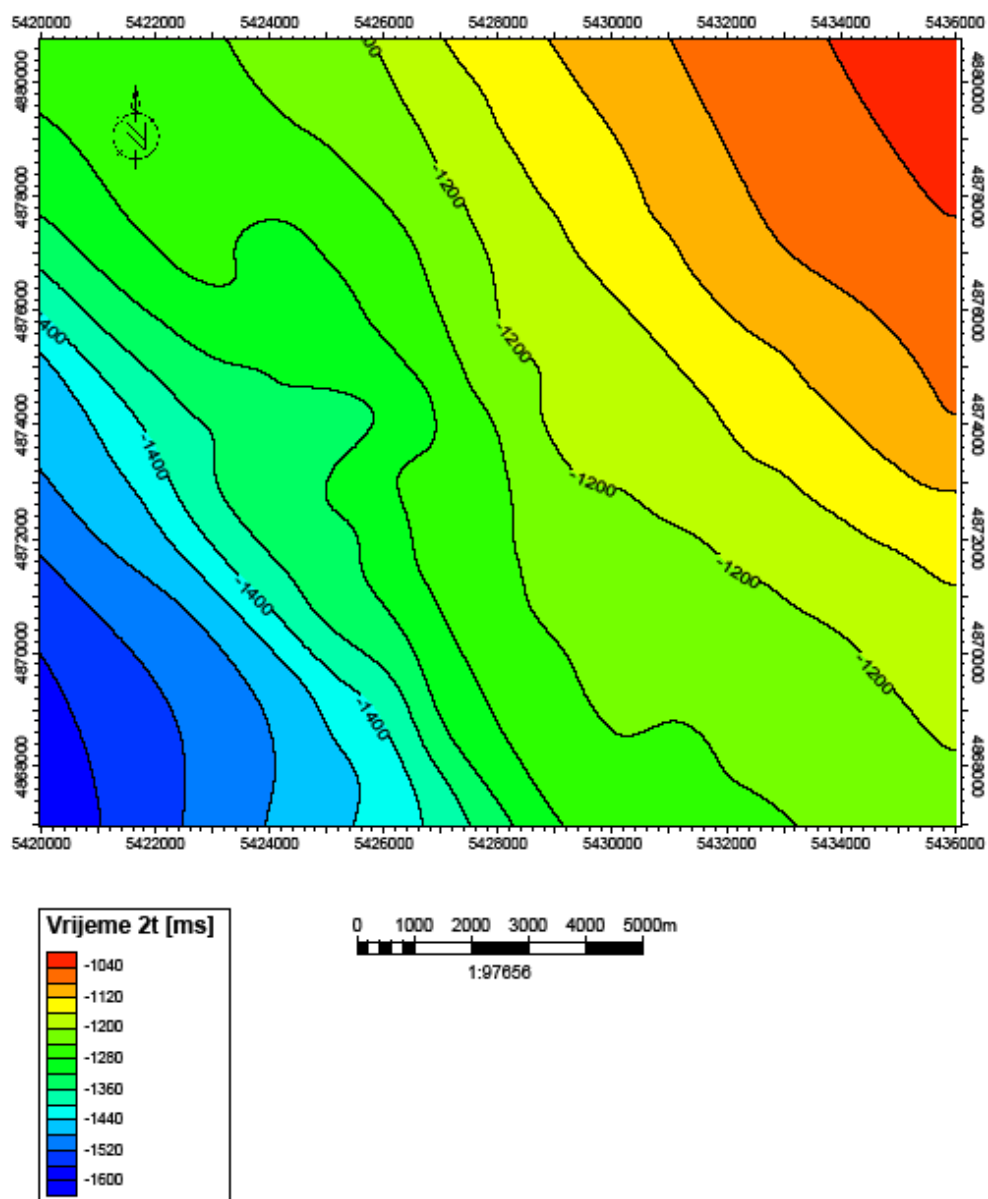
Slika 4.5 Uzdužni seizmički profil 2110

4.2 Strukturna interpretacija

Slika 4.5 prikazuje uzdužni seizmički profil 2110, gdje nema bijelih mrlja i povijanja horizonata, no postoji zanimljiva struktura ispod pretpliocenske diskordancije koja je na ovom profilu vrlo izražena a to je boranje u eocenskim vapnencima gdje se stvara asimetrična bora.

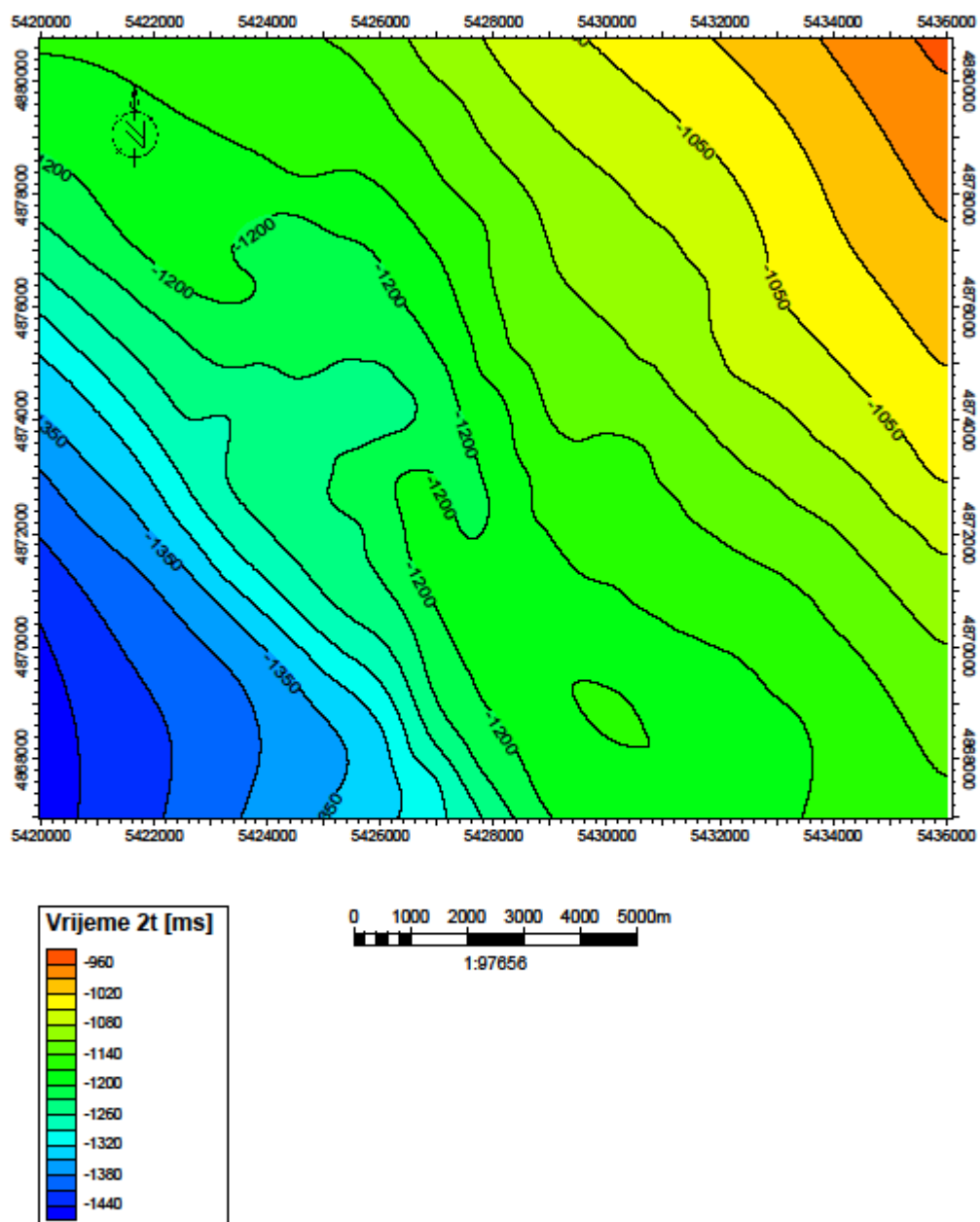
Struktura plinskog polja Katarina ima oblik izdužene antiklinale pružanja sjever sjeverozapad – jug-jugoistok. Antiklinala je nastala kao posljedica povremenih kompresijskih naprezanja (pleistocensko-kvartarne starosti), prilikom čega se sedimentna formacija Carola malo borala. Na slikama (4.6, 4.7, 4.8, 4.9 i 4.10) prikazane su strukturne karte interpretiranih horizonata (pretpliocenska diskordancija, formacija Santerno, PLQ-A, PLQ1-D te PLQ1-C). Na strukturnim kartama ležišta (PLQ-A, PLQ-D i PLQ-C) jasno vidi oblik antiklinale. Ležišta su starosti donjeg od srednjeg pleistocena, i sva su smještena unutar Carola formacije. Ležišta su vezana uz slabokonsolidirane turbiditne pješčenjake koji su u izmjeni sa šejlovima, i ujedno su matične stijene za plin (VIDAČEK, 2005).

Strukturna karta horizonta Pretpliocenska diskordancija

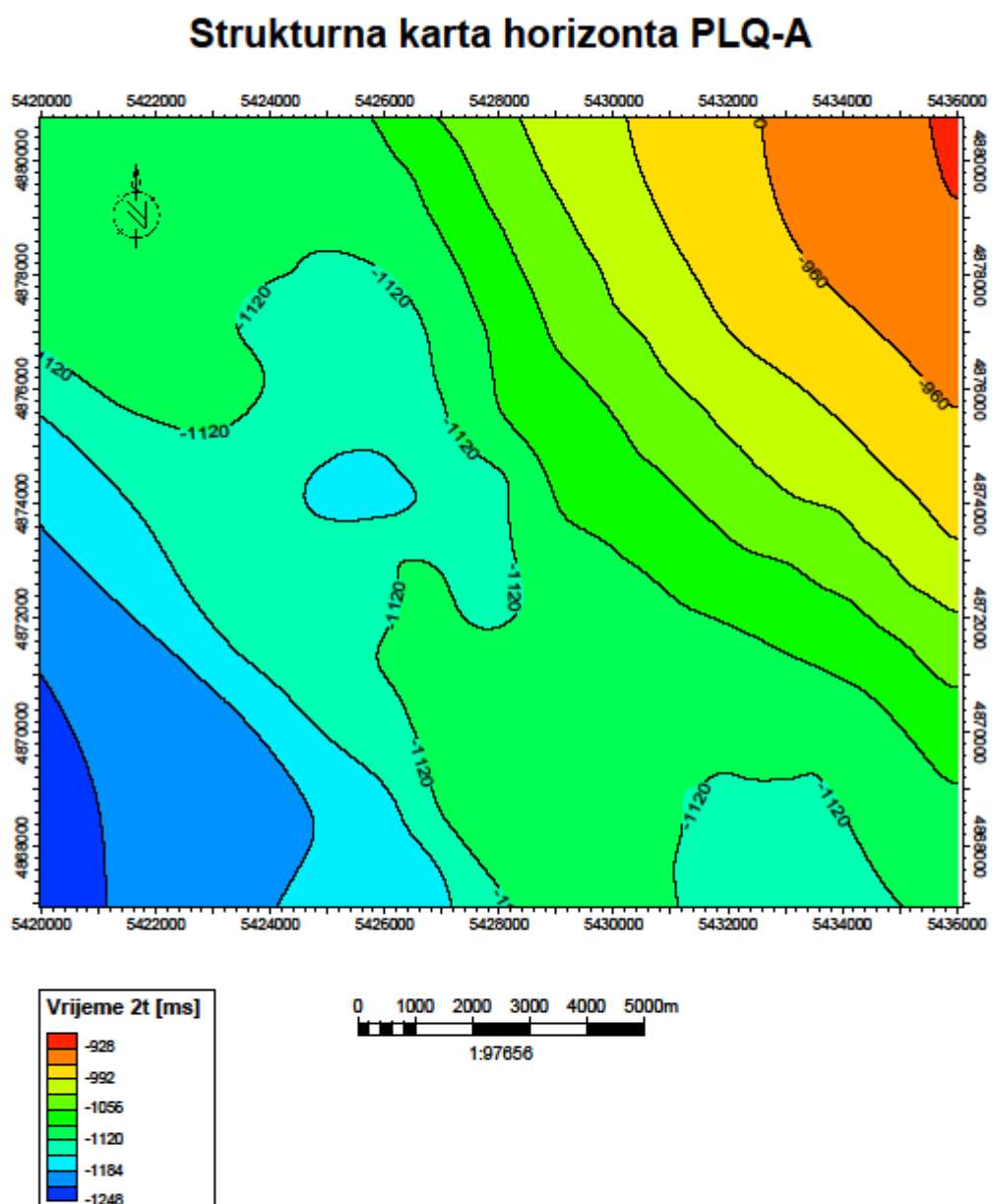


Slika 4.6 Strukturna karta horizonta pretpliocenske diskordancije

Strukturna karta horizonta Santerno

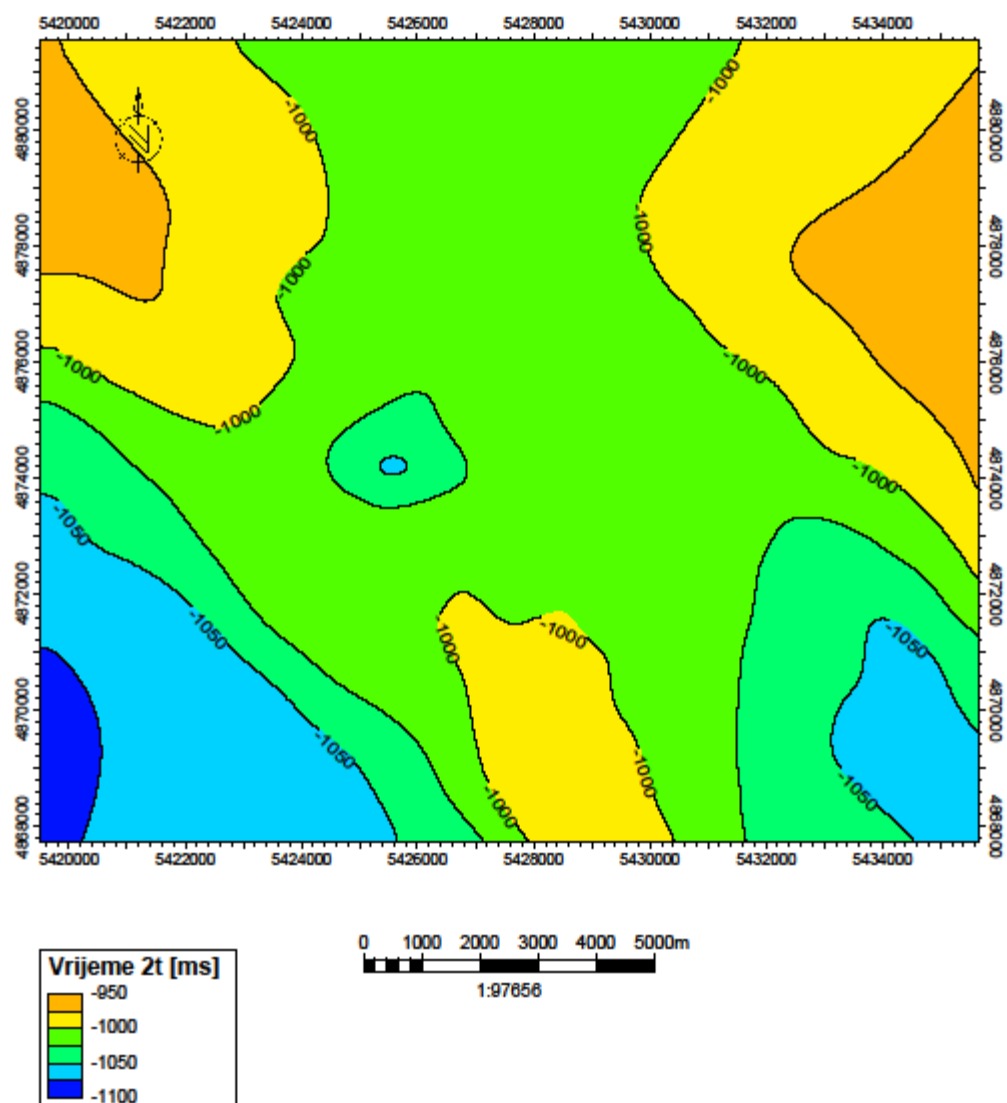


Slika 4.7 Strukturna karta horizonta Santerno



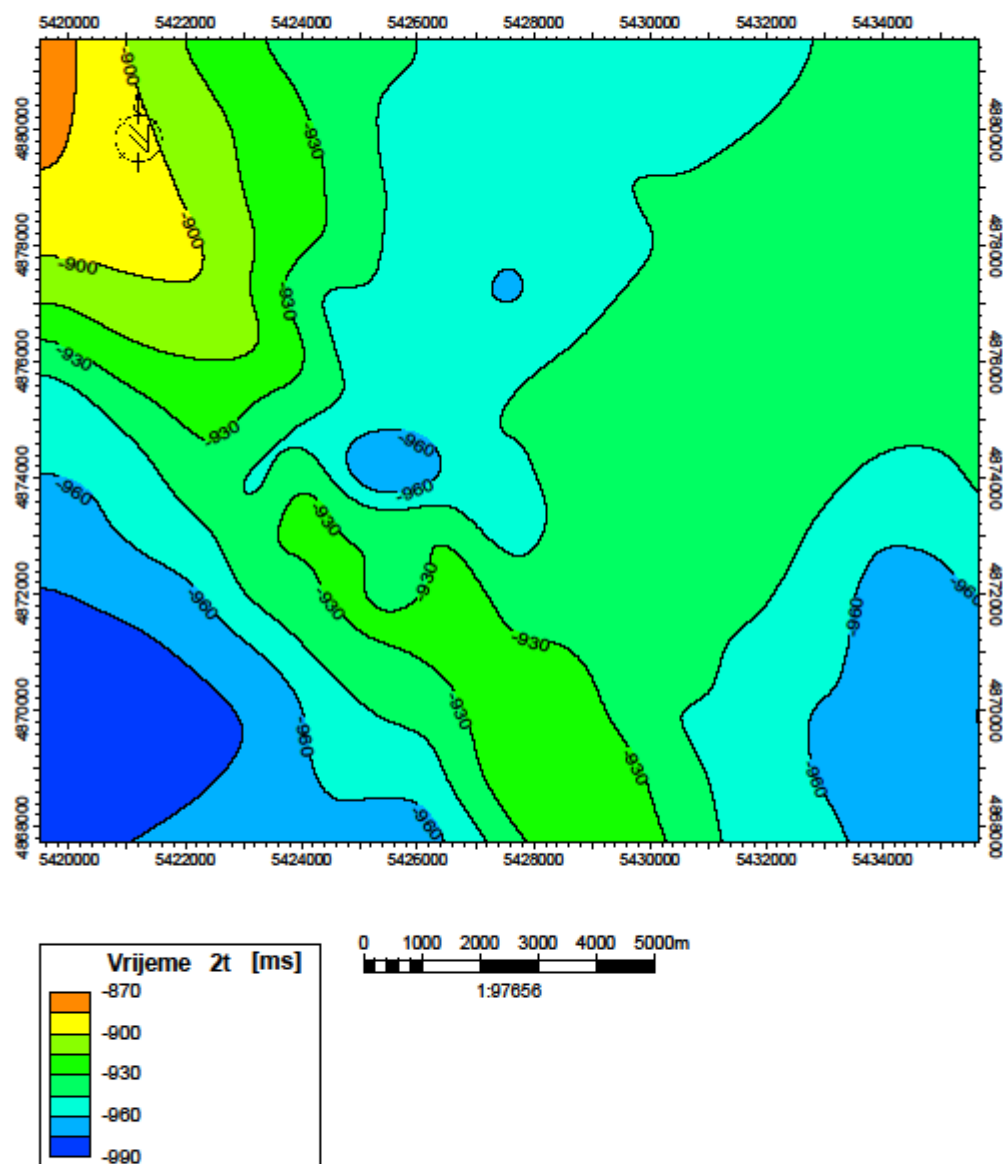
Slika 4.8 Strukturna karta horizonta PLQ-A

Strukturna karta horizonta PLQ1-D



Slika 4.9 Strukturna karta horizonta PLQ1-D

Strukturna karta horizonta PLQ1-C



Slika 4.10 Strukturna karta horizonta PLQ1-C

5. SEIZMIČKI ATRIBUTI

Ranih 1970-ih godina u seizmičkoj interpretaciji se počela primjenjivati analiza kompleksnog seizmičkog traga. Ova analiza, izmjenom prikaza seizmičkih podataka, omogućava njihovo bolje iskorištavanje, budući da daje informacije koje se u klasičnim prikazima nisu mogle u potpunosti iskoristiti (TANER et al, 1979).

Seizmički valovi su signali koji se mogu izraziti matematički. Dodatni podaci koji pomažu u interpretaciji dobivaju se odvajanjem seizmičkog traga na njegove sastavne komponente: amplitudu, fazu, vrijeme putovanja. Seizmički atributi su izračuni ili mjerenja izvedena iz seizmičkih podataka. Kao osnova za izračun seizmičkih atributa koristi se teorija digitalnog signala (SCHLUMBERGER, 2007).

Trenutna amplituda i trenutna faza osnovna su dva seizmička atributa. Svi ostali atributi izvode se iz njih, no zbog informacija koje pružaju, prividni polaritet i trenutnu frekvenciju je također moguće svrstati u temeljne attribute. Seizmički atribut zapravo je rezultat izmjene prikaza standardnih seizmičkih podataka, odnosno pretvaranja tih podataka u jednu od informacija koje seizmički val nosi u sebi.

Kvantitativne i kvalitativne informacije, dobivaju se analizom seizmičkih atributa iz volumena standardnih seizmičkih podataka. Primjena seizmičkih atributa u istraživanju je raznolika, od definiranja regionalnih odnosa, do strukturno-tektonske interpretacije i odnosa između taložnih jedinica. Seizmički atributi se u razradi ležišta koriste za definiranje ležišnih karakteristika kao što su zasićenje, promjena u kvaliteti ležišta te utvrđivanja bočnih granica ležišta (ŠUMANOVAC, 2012).

Iako postoji mnogo podjela seizmičkih atributa, vjerojatno je najčešća podjela na:

- 1) fizičke attribute ili refleksijske karakteristike;
- 2) geometrijske attribute ili oblik (konfiguraciju) refleksa.

Ipak, kako je ovaj rad rađen u Petrelu, držao sam se Schlumbergerove podjele seizmičkih atributa (SCHLUMBERGER, 2007):

- 1) Atributi kompleksnog seizmičkog traga,
- 2) Strukturni atributi,
- 3) Stratigrafski atributi,
- 4) Atributi seizmičkih horizonata

Prvoj grupi pripadaju atributi dobiveni iz kompleksnog seizmičkog traga koji se najčešće koriste u interpretaciji, a povezuje ih se s litološkim i rezervoarskim značajkama. U tu grupu ubrajaju se atributi poput trenutne amplitude, trenutne faze, trenutne frekvencije, kosinusa trenutne faze i sl..

Strukturni atributi daju odlične strukturne prikaze kanala, grebena i diskontinuiteta, a najpoznatiji član ove grupe je varijanca.

Stratigrafski atributi u svoju grupu ubrajaju kaos te relativnu akustičnu impedanciju. Njihovi podaci mogu pomoći pri interpretaciji rasjeda i diskontinuiteta, kanalnih ispuna i grebenskih struktura.

Atributi seizmičkih površina imaju nekoliko podskupina poput poput amplitudnih atributa, statističkih atributa te atributa oblika signala.

5.1 Hilbertova transformacija seizmičkog signala

Atributi kompleksnog seizmičkog traga započeli su svoj razvoj kada su Taner i dr. (1979) zaključili da snimljeni seizmički signal predstavlja kinetički dio ukupne energije gibanja čestica. Onda su uvidjeli da mogu izračunavati potencijalnu energiju iz kinetičke koristeći Hilbertove transformacije. Njihova upotreba omogućila je izračunavanje svih kompleksnih seizmičkih atributa (slika 5.1).

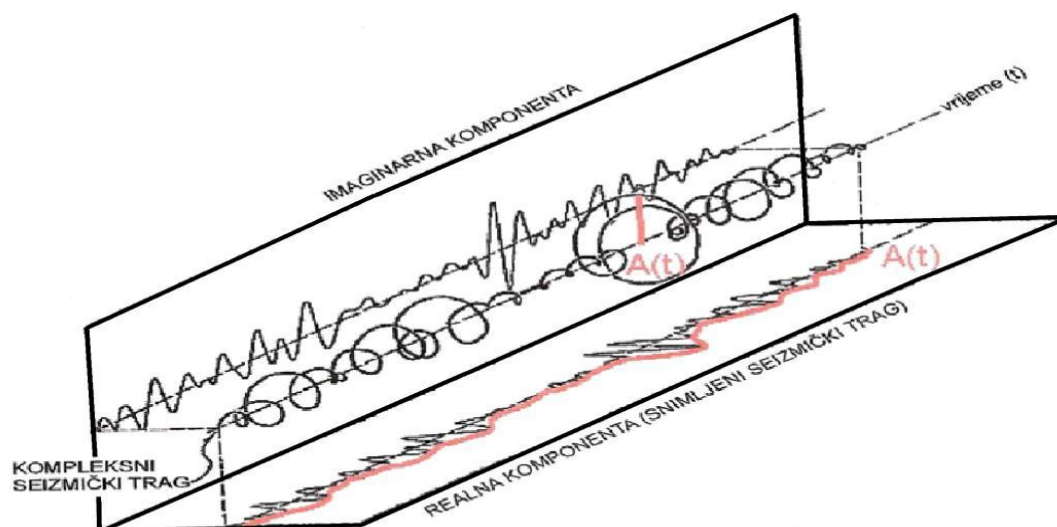
Širenje seizmičkih valova kroz stijene opisano je valnom jednažbom, čija su rješenja sinusoidalne funkcije. Koristeći Hilbertovu transformaciju, moguće je povezati realnu ($x(t)$) i imaginarnu ($y(t)$) komponentu.

$$y(t) = H[x(t)], \quad (5-1)$$

gdje je H – Hilbertova transformacija.

Pri tome je kompleksni seizmički signal

$$s(t) = x(t) + iy(t) \quad (5-2)$$



Slika 5.1 Prikaz kompleksnog seizmičkog traga (TANER et al, 1979)

Obzirom da nam je cilj dobiti oblik seizmičkog traga u polarnim koordinatama, amplituda i faza u tom slučaju daju novu perspektivu:

$$x(t) = A(t)\cos\theta(t), \quad (5-3)$$

gdje je $A(t)$ – amplituda, a $\theta(t)$ – faza.

Imaginarni dio seizmičkog traga, Hilbertova je transformacija realne funkcije, a kako je Hilbertova transformacija funkcije $\cos(t)$, $\sin(t)$, $s(t)$ je:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + H[x(t)]^2} = |s(t)| \quad (5-4)$$

$$\theta(t) = \arctg \frac{H[y(t)]}{x(t)} \quad (5-5)$$

Trenutna amplituda $A(t)$ i faza $\theta(t)$ predstavljaju polarni oblik kompleksnog seizmičkog traga, odnosno predstavljaju sam seizmički signal, te se nazivaju temeljnim atributima.

Trenutna frekvencija izračunava se iz faze, prema:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}; \quad \omega(t) - \text{trenutna frekvencija} \quad (5-6)$$

5.2 Atributi kompleksnog traga

5.2.1 Trenutna amplituda

Trenutna amplituda (eng. *Envelope*), koja je također poznata i kao snaga refleksije (eng. *Reflection Strength*), definirana je kao ukupna energija seizmičkog traga. Drugim riječima, to je apsolutna vrijednost kompleksnog seizmičkog traga, koji se sastoji od realnog i imaginarnog dijela (DABER et al, 2007).

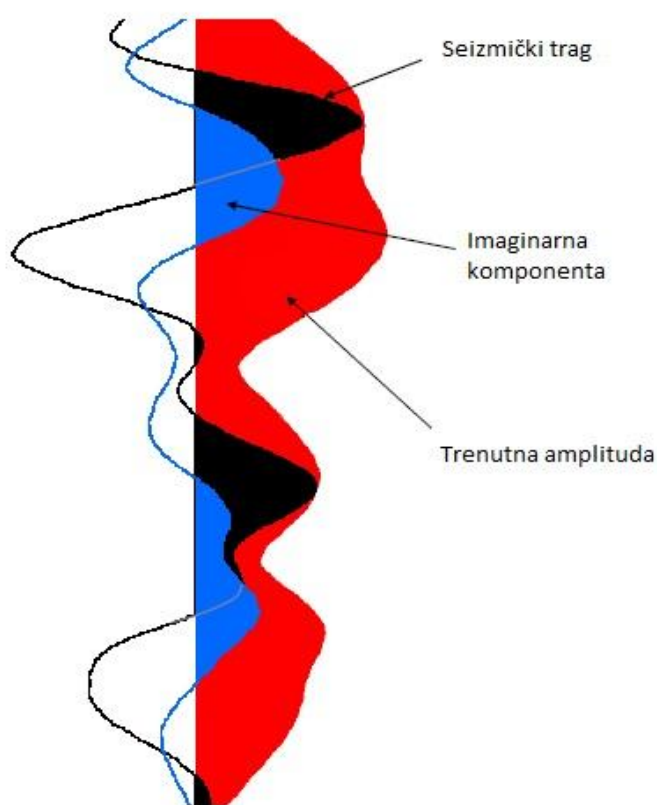
Matematički je izražena pomoću:

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} = |s(t)|. \quad (5-7)$$

Realni dio $x(t)$, je izvorni seizmički trag, dok je $y(t)$ imaginarni dio (slika 5.2). Atribut trenutne amplitude neovisan je o fazi, te je uvijek pozitivnih vrijednosti. Trenutna amplituda od velike je važnosti za otkrivanje svijetlih točaka (eng. *Bright spot*) uzrokovanih akumulacijom plina, otkrivajući glavne litološke promjene koje su uzrokovane snažnim refleksijama energije i sekvencijskim granicama. Ovaj atribut jasno pokazuje litološke promjene koje možda nisu očite na seizmičkim podacima.

U ležištima, blisko smješteni reflektori ponekad se međusobno miješaju na seizmičkim podacima, što čini njihovo razdvajanje vrlo teškim u seizmičkoj interpretaciji. No pomoću atributa trenutne amplitude možemo razlikovati značajke, koje nije uvijek lako otkriti na uobičajenom seizmičkom prikazu.

Korištenje trenutne amplitude u kombinaciji s originalnom seizmikom dobra je opcija za kvalitetniju interpretaciju ležišta (SCHLUMBERGER, 2007). Maksimalna snaga refleksije može se razlikovati od najveće amplitude brijega ili dola stvarnog seizmičkog traga. Kod trenutne amplitude vrlo je bitno pratiti visoke vrijednosti obzirom da su najčešće vezane za diskordancije, odnosno za nagle litološke promjene, i granice koje su uzrokovane promjenama okoliša taloženja ili razina mora. Velike vrijednosti trenutne amplitude može uzrokovati i akumulacija plina, pa se mogu otkriti “bije mrlje“, kao neposredni indikator prisustva ugljikovodika (ŠUMANOVAC, 2012)



Slika 5.2 Trenutna amplituda (SCHLUMBERGER, 2007)

5.2.2 Trenutna faza

Trenutna faza (eng. *Instantaneous phase*) atribut je koji daje jednako težinu i jakim i slabim refleksima, a čiji matematički oblik glasi:

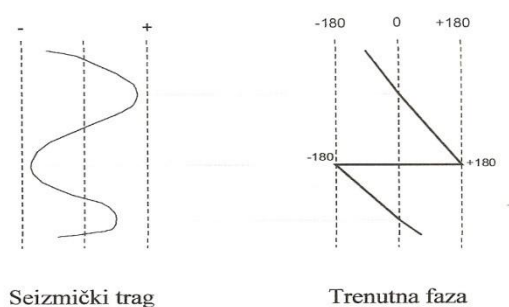
$$\theta(t) = \arctg \frac{y(t)}{x(t)}, \quad (5-8)$$

gdje je $\theta(t)$ – faza, $y(t)$ – imaginarni, a $x(t)$ - realni dio.

Trenutna faza, može poprimiti vrijednosti u granicama između -180° i $+180^\circ$ i, neovisna je o trenutnoj amplitudi (SCHLUMBERGER, 2007).

Ovaj atribut predstavlja kut koji fazor (vektor koji rotira; mijenja fazu u vremenu) zatvara s realnom osi. Kada dolazi do promjene realnog seizmičkog signala od brijega (maksimuma) prema dolu (minimuma), trenutna faza se mijenja od 0° do $+180^\circ$. U točki minimalne amplitude trenutna faza se promijeni od $+180^\circ$ na -180° . Za razliku od toga, kada idemo od minimuma prema maksimumu stvarnog seizmičkog traga trenutna faza se mijenja od -180° do 0° . Nulta faza će dakle odgovarati svim maksimumima na stvarnom seizmičkom tragu, neovisno o vrijednosti amplitude, slika 5.3.

Obzirom da je neovisan o trenutnoj amplitudi, atribut trenutne faze dobar je indikator kontinuiteta, rasjeda, sekvencijskih granica, te granica slojeva (SCHLUMBERGER, 2007).



Slika 5.3 Grafički prikaz trenutne faze

5.2.3 Trenutna frekvencija

Trenutna frekvencija $\omega(t)$ predstavlja vremensku promjenu trenutne faze a izražava se formulom (5-6). Prema definiciji, trenutna frekvencija (eng. *Instantaneous Frequency*) je brzina promjene trenutne faze ili kut koji fazot (vektor koji rotira) zatvara s realnom osi. Trenutna frekvencija ima uglavnom jednolike i pozitivne vrijednosti, no može poprimiti i negativne vrijednosti (SCHLUMBERGER, 2007). To se događa kada se obrne vrijednost kuta faze, i to na način da u točki infleksije vektor, koji se do tada kretao suprotno od kazaljke na satu, usporava i mijenja smjer, odnosno frekvencija postane negativna (WHITE, 1991).

Trenutna frekvencija, neovisna je o amplitudi te je korisna u otkrivanju značajki ležišnih stijena kao npr. ugljikovodika, pukotinskih zona, te promjena u debljini i lateralnih promjena litologije. Također, trenutna frekvencija ima veću rezoluciju nego amplituda što može biti korisno kod kartiranja promjena facijesa (SCHLUMBERGER, 2007).

5.2.4 Kosinus trenutne faze

Kosinus trenutne faze, također zvan i "normirana amplituda", predstavlja kosinus kuta trenutne faze:

$$\cos\theta(t) = \frac{x(t)}{A(t)} \quad (5-9)$$

To je još jedan koristan atributni podatak. Pravi trag $x(t)$, je definiran kao produkt amplitude $A(t)$ i kosinusa trenutne faze $\theta(t)$, Drugim riječima, pravi seizmički trag, $x(t)$ je podijeljen sa snagom refleksije $A(t)$ (SCHLUMBERGER, 2007).

Funkcija kosinus ima raspon od -1 do +1. Kosinus faze ima vrlo sličnu primjenu kao i trenutna faza te se i koriste na sličan način, ali nudi i značajnije prednosti. Umjesto diskontinuiranih vrijednosti trenutne faze, podaci kosinusa faze kontinuirano

osciliraju između pozitivnih i negativnih vrijednosti. Upravo zbog toga, uobičajene boje omogućavaju lakše analiziranje prikaza kosinusa faze.

Ovaj atribut je odličan indikator lateralnih kontinuiteta, stratigrafskih prekida i promjena facijesa. Također, često se koristi za kvalitetniji prikaz refleksa teških za interpretaciju (SCHLUMBERGER, 2007).

5.2.5 Kaos

Kaos pripada u grupu stratigrafskih atributa, a kartira "kaotičnost" lokalnog seizmičkog signala unutar 3D vremenskog prozora. Područja sa slabijim kontinuitetom odgovaraju kaotičnom signalu, te većim kaotičnim vrijednostima. Te vrijednosti su najčešće pridružene lokalnim geološkim značajkama poput rasjeda i diskontinuiteta, kanalnih ispuna i grebenskih struktura (SCHLUMBERGER, 2007).

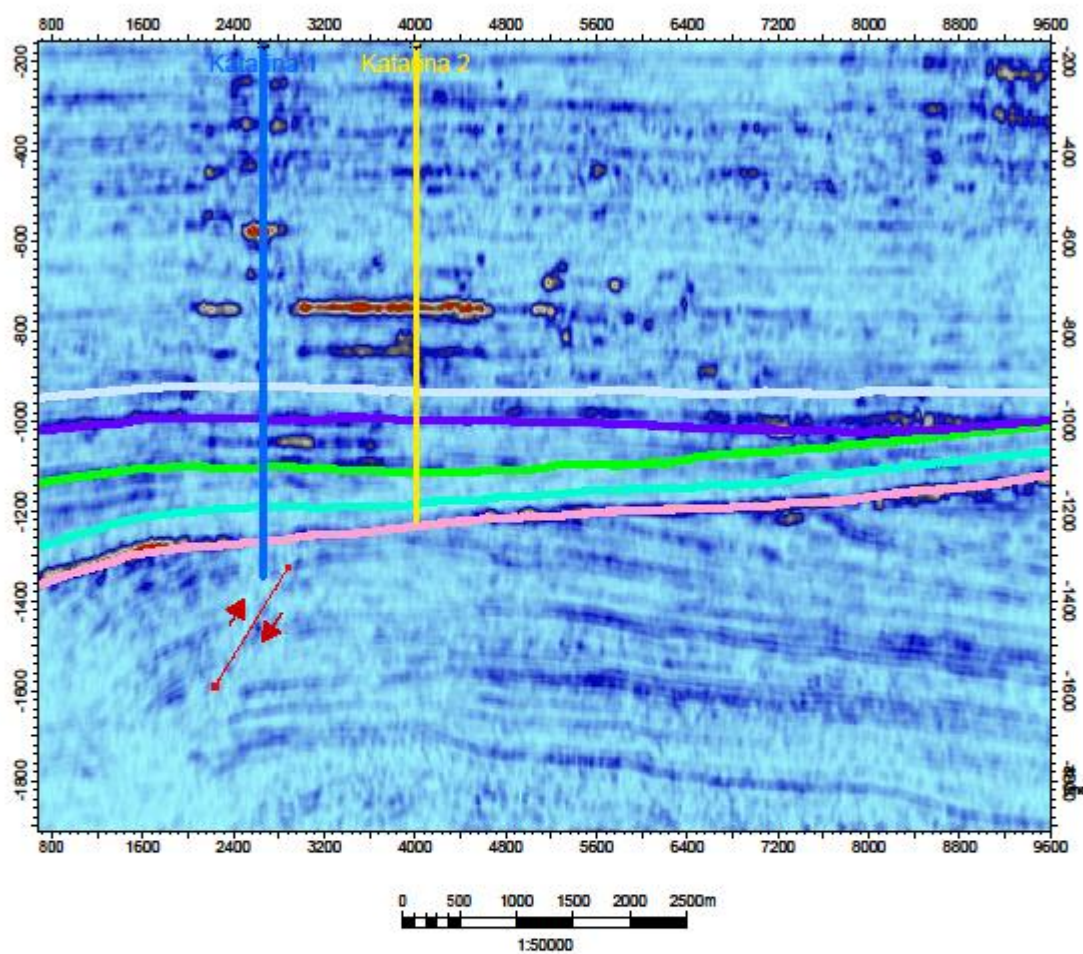
Karakteristična stavka vezana uz atribut kaosa je nevezanost za amplitudu, tako da će atribut dati jednaki odziv bilo pri malim, bilo pri velikim amplitudama.

5.2.6 Varijanca

Varijanca je u programskom paketu Petrel™ 2014 smještena u skupinu stratigrafskih atributa (SCHLUMBERGER, 2007). Najčešće se koristi za prikaz diskontinuiteta, te omogućava izoliranje rubova odnosno diskontinuiteta u horizontalom pružanju. Također, omogućava i vertikalno zaglađivanje koje može pomoći smanjiti horizontalne strukture i unaprijediti vertikalni pregled. Odlična je za prikaz kanala i grebenskih struktura.

Varijanca je ponudila i odličan prikaz kanala oko dvostrukog vremena putovanja vala od 591 ms, a o tome nešto više u idućem poglavlju.

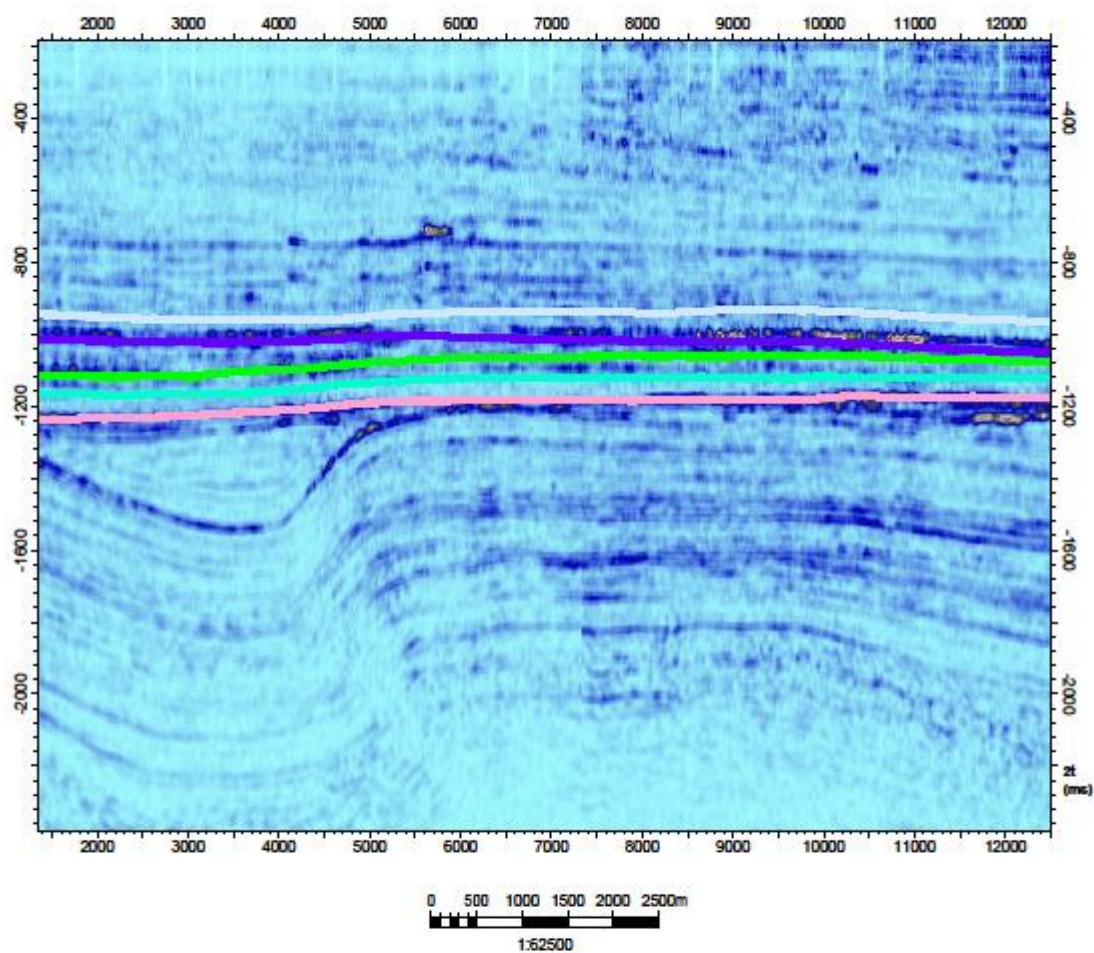
Selzmički atribut Trenutna amplituda (Iniline 11650)



- Legenda:
- Pretpliocenska diskordancija
 - Santerno
 - PLQ-A
 - PLQ1-D
 - PLQ1-C
 - Reversni rasjed
 - Katarina 1
 - Katarina 2

Slika 5.4 Poprečni profil 11650 prikazan atributom trenutne amplitude

Seizmički atribut Trenutna amplituda (XLine 2100)

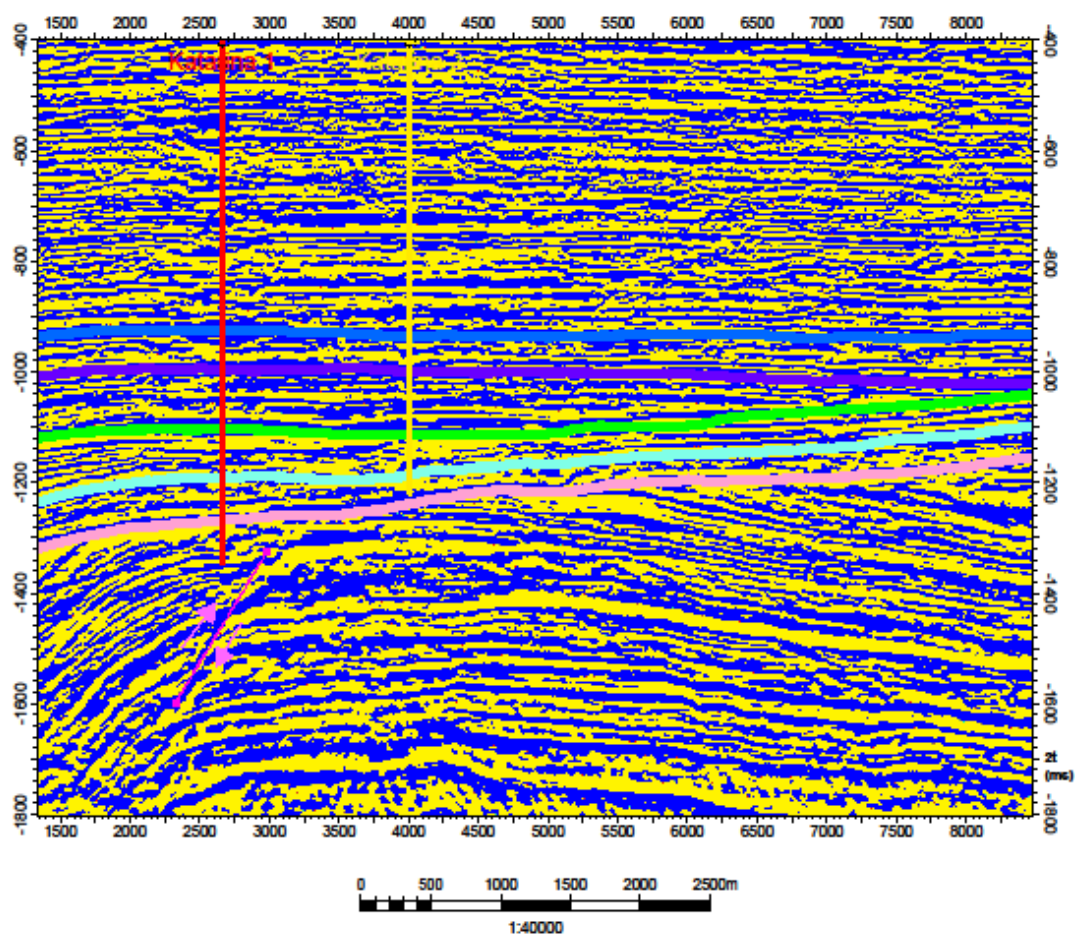


Legenda:

- Pretpliocenska diskordancija
- Santerno
- PLQ-A
- PLQ1-D
- PLQ1-C

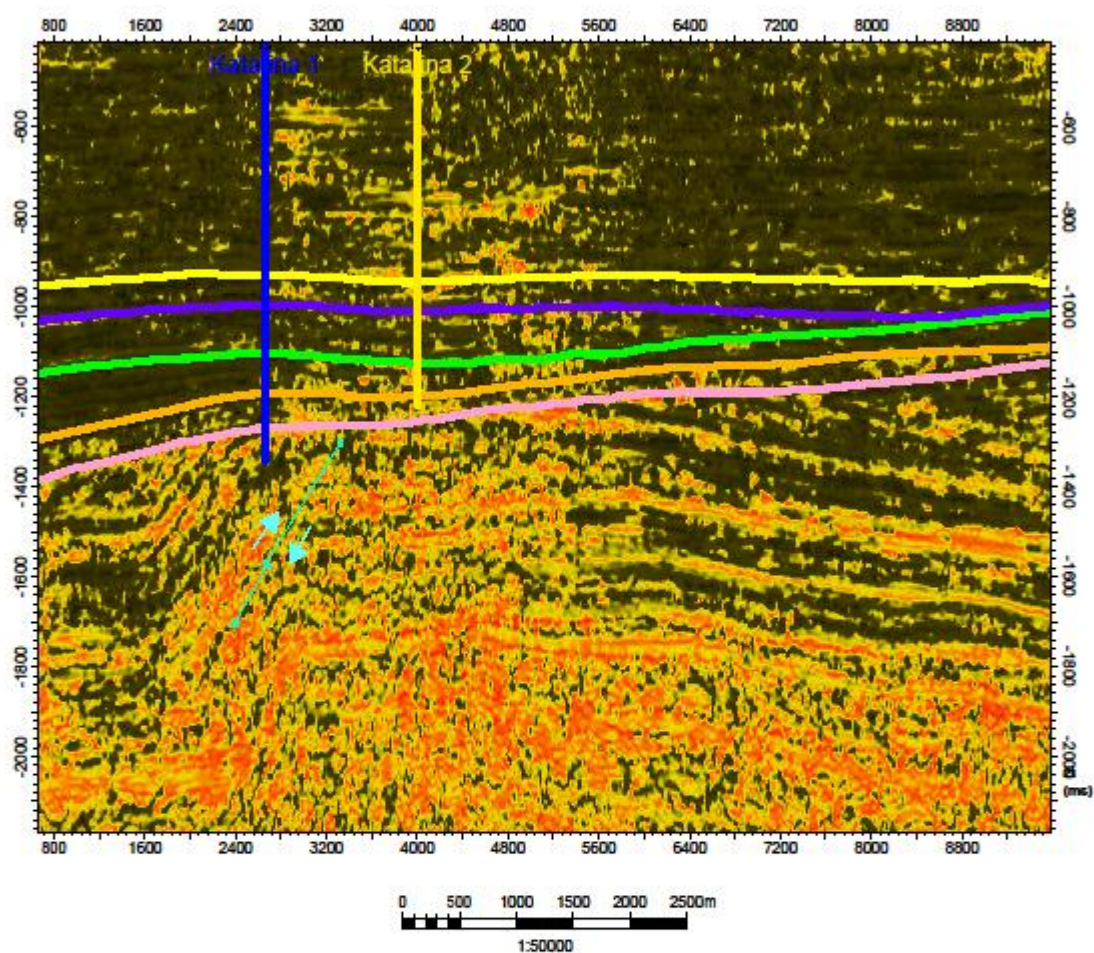
Slika 5.5 Uzdužni profil 2100 prikazan atributom trenutne amplitude

Selzmički atribut Trenutna faza (Inline 11640)



Slika 5.6 Poprečni profil 11640 prikazan atributom trenutne faze

Seizmički atribut Trenutna frekvencija (Inline 11610)

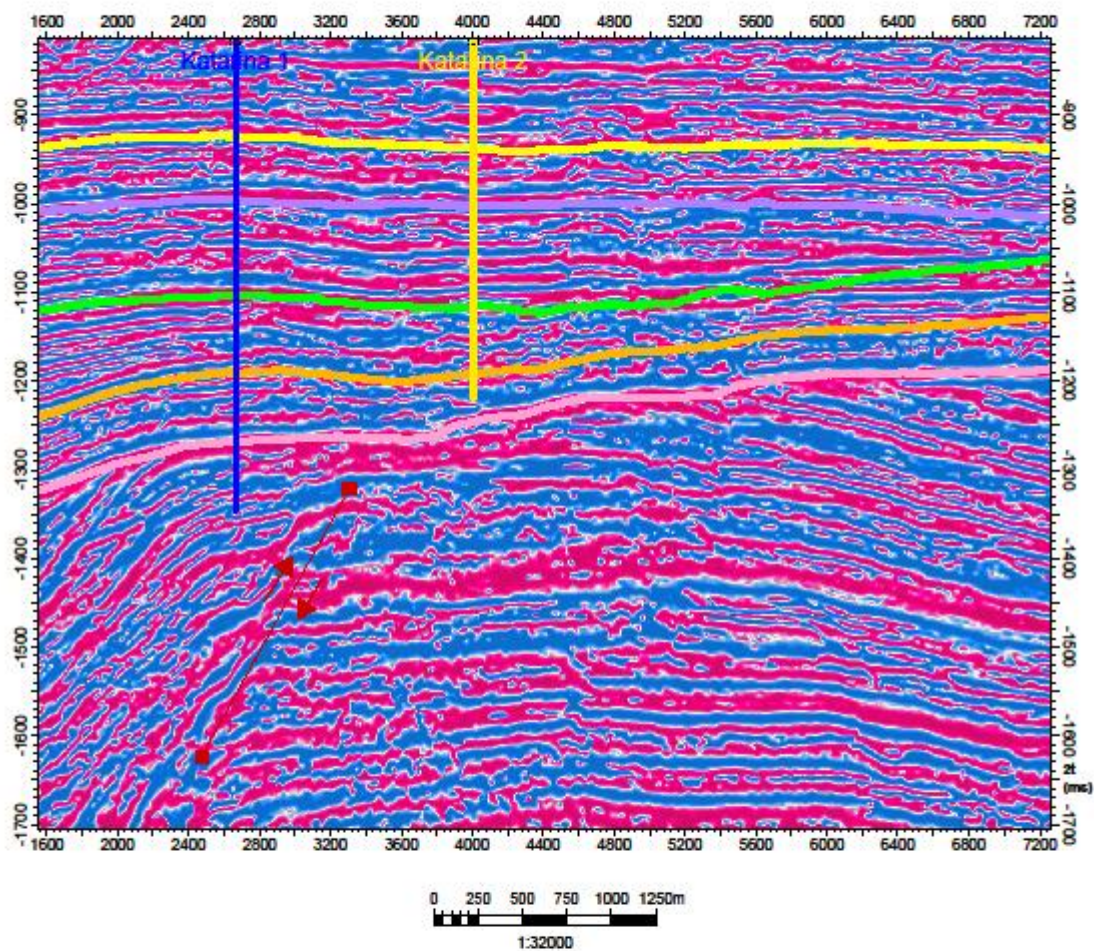


Legenda:

- Pretpliocenska diskordancija
- Santerno
- PLQ-A
- PLQ1-D
- PLQ1-C
- Reversni rasjed
- Katarina 1
- Katarina 2

Slika 5.7 Poprečni profil 11610 prikazan atributom trenutne frekvencije

Selzmički atribut Kosinus faze (Inline 11620)

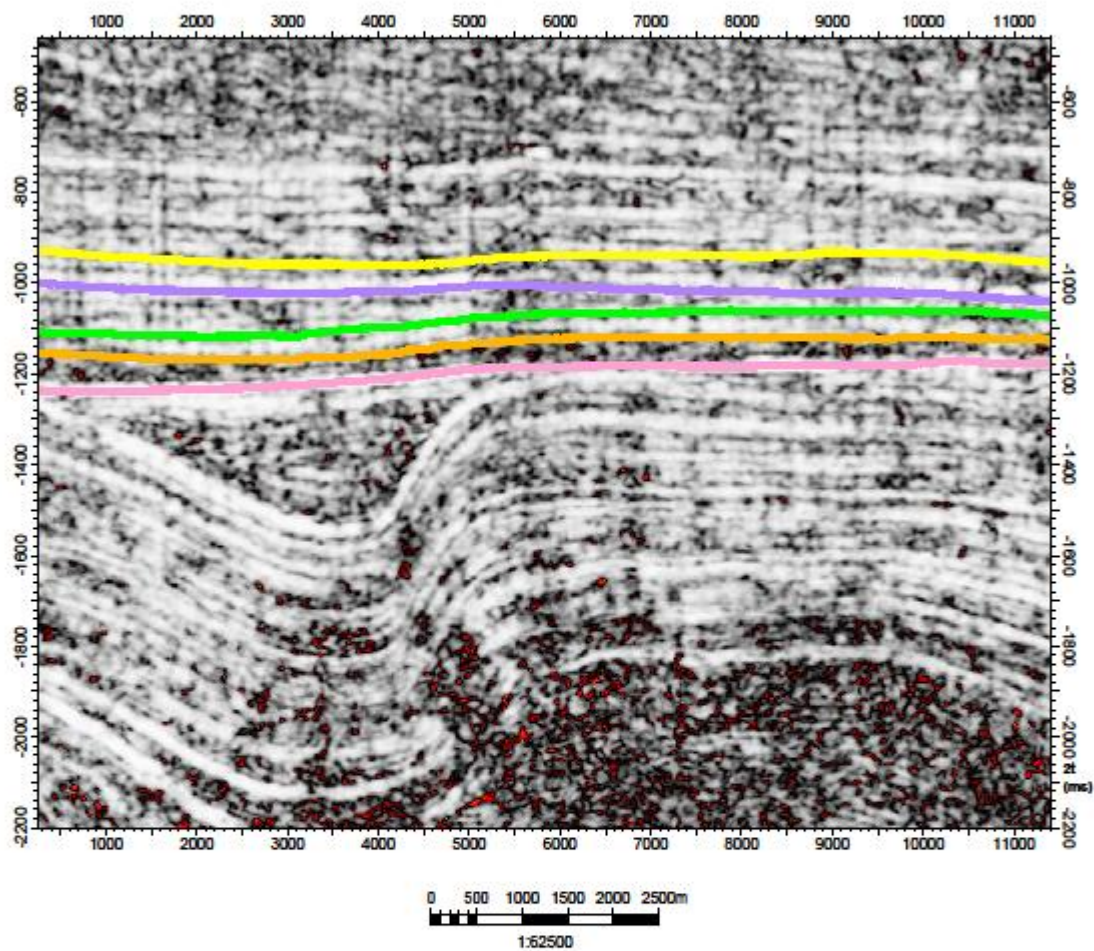


Legenda:

- Pretpliocenska diskordancija
- Santerno
- PLQ-A
- PLQ1-D
- PLQ1-C
- Reversni rasjed
- Katarina 1
- Katarina 2

Slika 5.8 Poprečni profil 11620 prikazan atributom kosinusa trenutne faze

Selzmički atribut Kaos (XLine 2100)

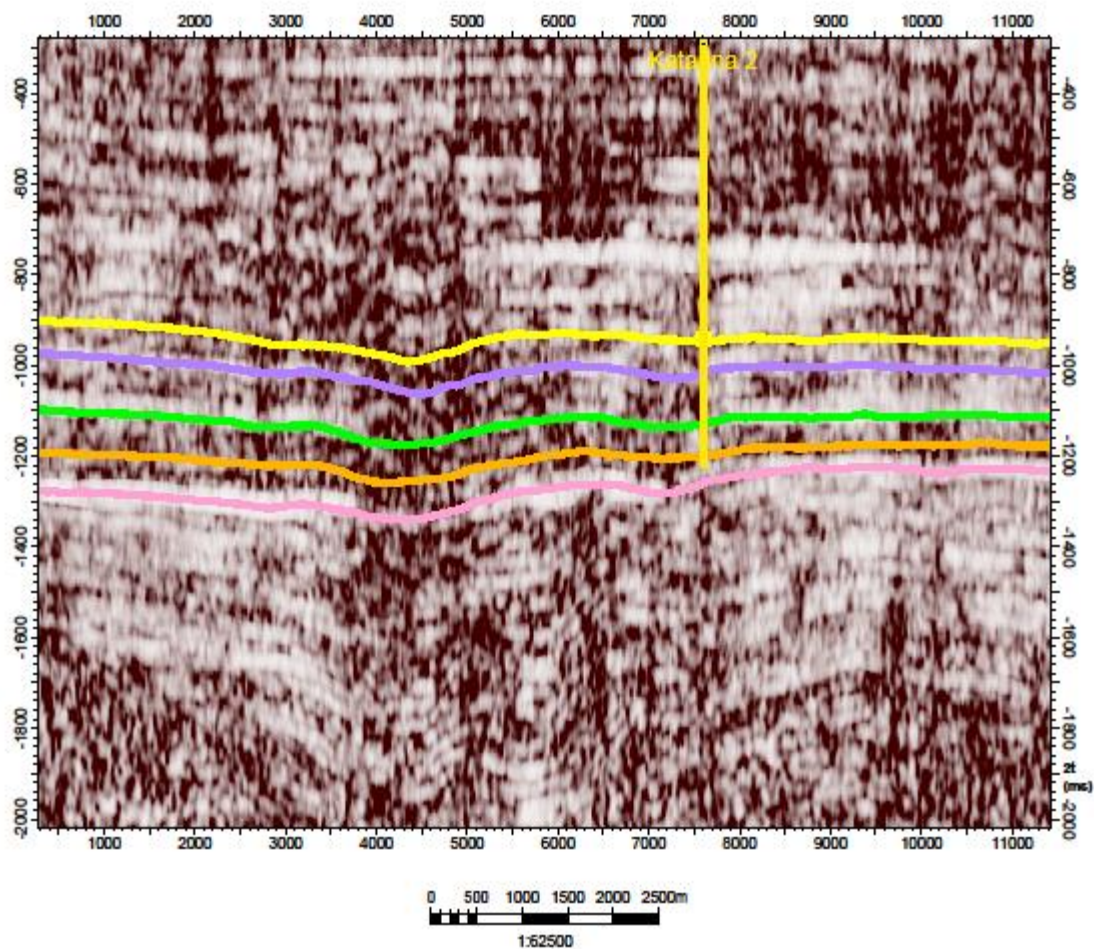


Legenda:

- Pretpliocenska diskordancija
- Santerno
- PLQ-A
- PLQ1-D
- PLQ1-C

Slika 5.9 Uzdužni profil 2100 sa prikazanim atributom kaos

Selznički atribut Varljanca (XLine 1820)



Legenda:

- Pretpliocenska diskordancija
- Santerno
- PLQ-A
- PLQ1-D
- PLQ1-C
- Katarina 2

Slika 5.10 Uzdužni profil 1820 sa prikazanim atributom varijanca

Slika 5.4 prikazuje trenutnu amplitudu poprečnog profila 11650. Vidljive su promjene u vrijednostima trenutne amplitude, a najviše vrijednosti (prikazane bijelom bojom) ukazuju na bijele mrlje, odnosno akumulacije plina. Lako je pratiti pretpliocensku diskordanciju gdje dolazi do jasnih litoloških promjena što se očituje u promjeni vrijednosti trenutne amplitude. Na slici 5.5 prikazana je trenutna amplituda na uzdužnom profilu 2100 gdje se dosta jasno vidi boranje ispod pretpliocenske diskordancije te je vrlo jasno izražena krovina ležišta PLQ1-D na oko 1010 ms, te PLQ1-A. Trenutna amplituda omogućila je dobro definiranje granica plinskih ležišta te jasno prikazala pojave bijele mrlje i boranja ispod pretpliocenske diskordancije.

Slika 5.6 prikazuje trenutnu fazu na poprečnom profilu 11640. Odmah na prvi pogled vidljiva je kvaliteta ovog atributa kod prikazivanja kontinuiteta, te je bio od velike pomoći pri interpretaciji horizonata i praćenju granica ležišta, posebno PLQ1-D i PLQA. Također vrlo dobro se vidi položaj reversnog rasjeda na ovom poprečnom profilu.

Na slici 5.7 prikazan je atribut trenutna frekvencija na poprečnom profilu 11610, na kojem su vidljivi položaji bušotina Katarina-1 i Katarina-2, te reversni rasjed. Crnom bojom prikazana su područja visokih frekvencija i ukazuju na promjene u litologiji, dok su crvenom bojom prikazana područja niske frekvencije koja mogu ukazivati na pojavu plina ili pukotinskih zona. Pomak prema nižim frekvencijama naziva se i "niskofrekvencijska sjena" te je često zapažena na refleksima ispod pijeska s plinom i kondenzatom. Ovaj atribut ponudi je najmanju pomoć pri interpretaciji horizonata izuzev jasno vidljivog rasjeda.

Slika 5.8 prikazuje kosinus trenutne faze na poprečnom profilu 11620. Možda i najkorišteniji atribut za interpretaciju horizonata u ovome radu, pokazao se izvrsnim upravo zbog odličnog prikaza kontinuiteta, te zbog odličnog izbora boja koje su omogućavale lakše praćenje horizonata.

Slika 5.9 prikazuje atribut kaos na uzdužnom profilu 2100 kod kojeg su napravljene sitne promjene u originalnim bojama seizmičkog atributa, ne bi li se dobili bolji kontrasti. Na slici se odlično vidi boranje ispod pretpliocenske diskordancije, te je također relativno lako pratiti sam horizont pretpliocenske diskordancije, kao i ležište PLQ-D.

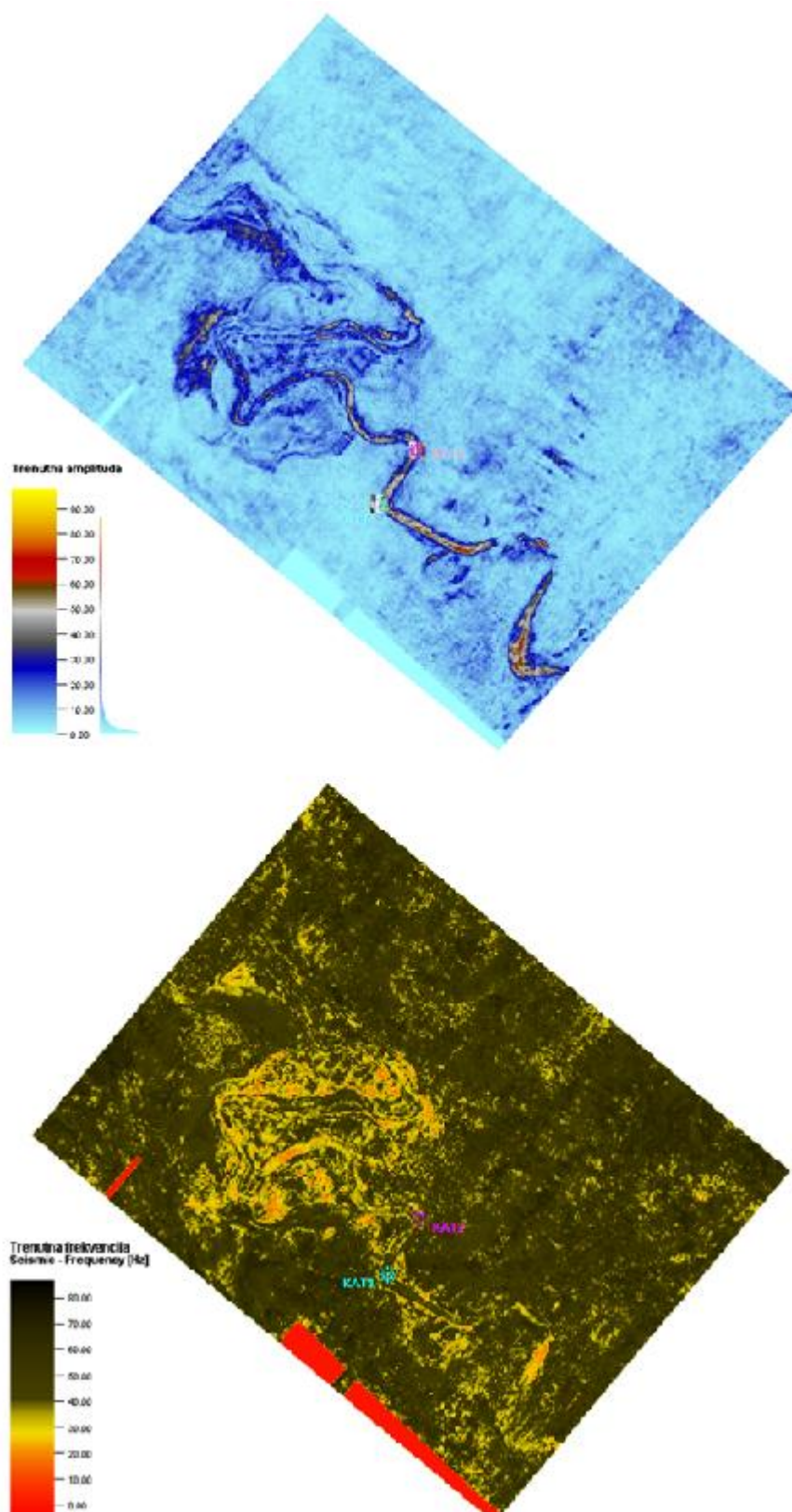
Na slici 5.10 prikazana je varijanca na poprečnom profilu 1820, gdje se odlično vidi područje povijanja horizonata na mjestima akumulacije plina, i lako se daju pratiti pretpliocenska diskordancija i ležište PLQ1-A.

5.3 Horizontalni atributni presjeci i kanal

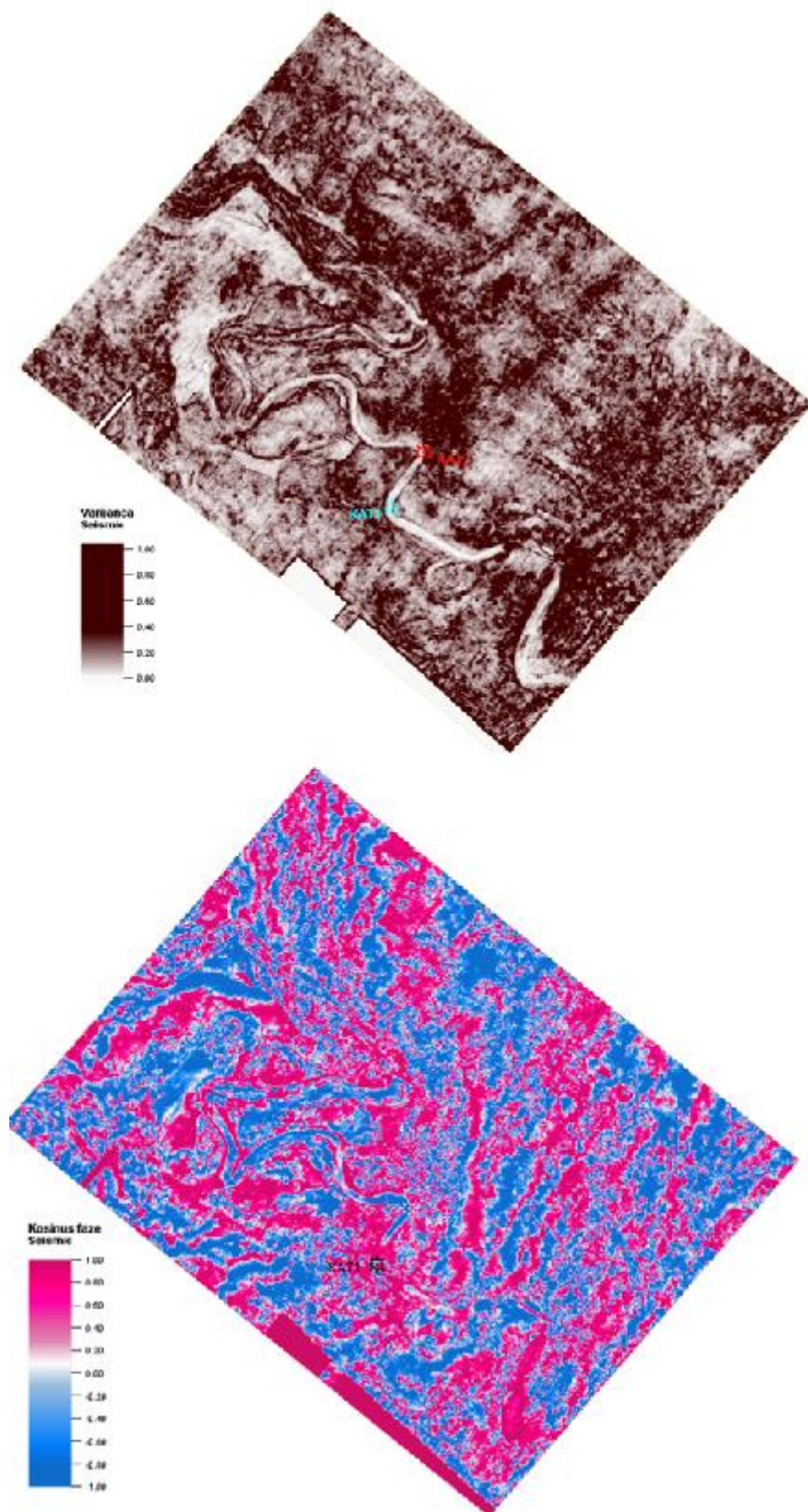
Nakon izrade vertikalnih presjeka za svaki od odabranih seizmičkih atributa, izrađeni su i horizontalni presjeci po vremenskoj osi z , za svaki od opisanih seizmičkih atributa (trenutna faza, trenutna frekvencija, trenutna amplituda, kosinus trenutne faze, varijanca i kaos) te je dodan atribut originalna amplituda. Oko dvostrukog vremena putovanja vala od 591 ms postoji vrlo zanimljiva pojava kanala. Kanal je izgleda meandrirajućeg riječnog korita, a na horizontalnim profilima je primjetan kao bijela mrlja.

Bijele mrlje su zone bez refleksa, do kojih dolazi zbog raspršivanja seizmičke energije, uslijed prisutnosti plina u propusnim stijenama. Na mjestima pojave bijelih mrlja dolazi do smanjenja seizmičkih brzina što je uzrokovano povećanim zasićenjem stijene fluidom. Na profilima je izražena promjena polariteta refleksa na krovini ležišta. Plin također uzrokuje karakterističnu pojavu povlačenja refleksa prema dolje te se dobiva privid sinklinale (ŠUMANOVAC, 2012). Ova pojava se može vidjeti na profilima prikazanim u poglavlju 4.1 (slike 4.2, 4.3, 4.4).

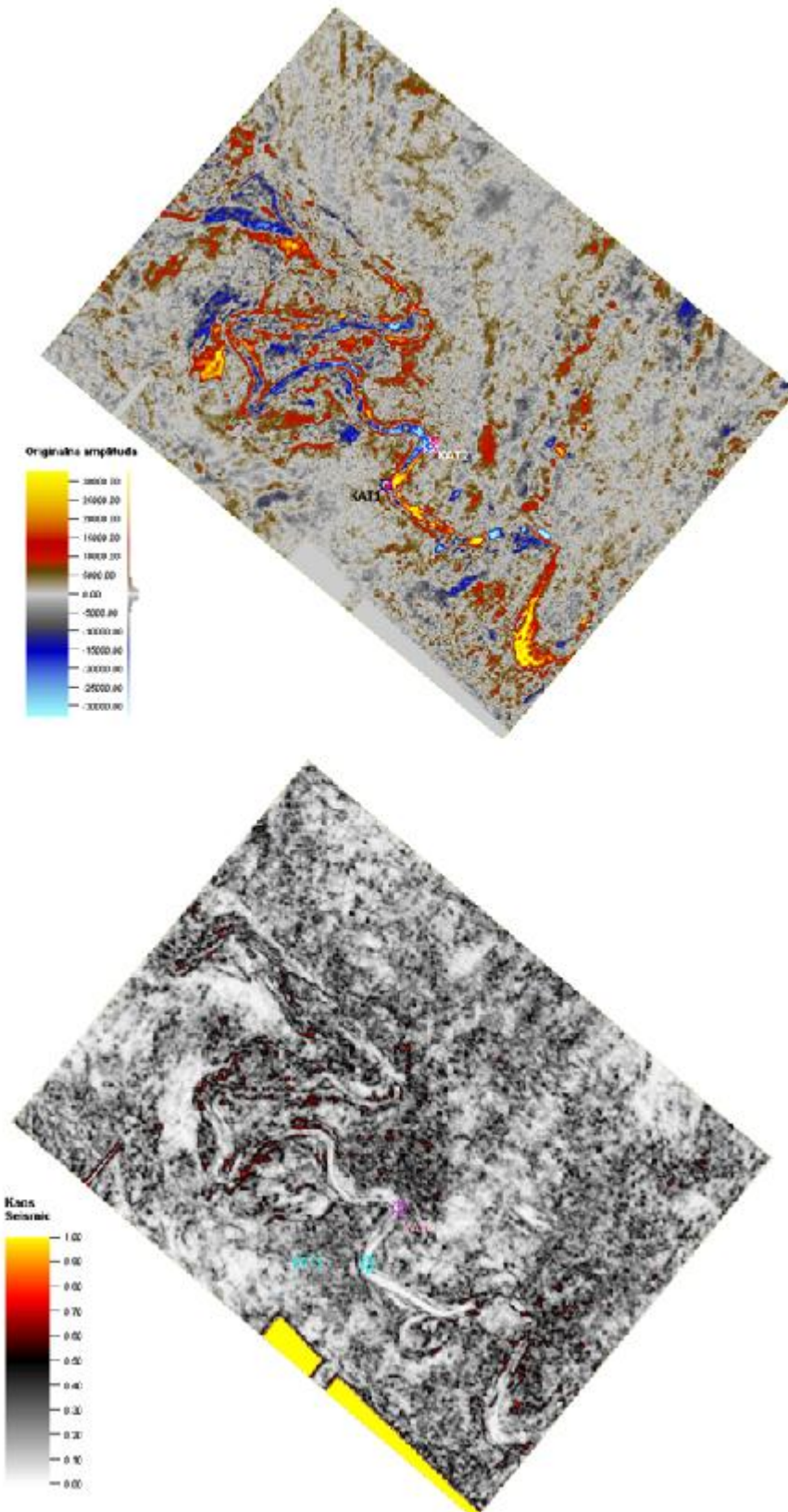
Meandrirajuće riječno korito ispunjeno je klastičnim sedimentima i zasićenim plinom pa su neki od atributa dali jasan prikaz kanala. Kanal je uočljivi oko dvostrukog vremena putovanja vala od 591 ms (tj. dubini koja odgovara najplićem ležištu). Postoje još dva kanala oko dvostrukog vremena od 660 ms i 750 ms no oni nisu bijele mrlje, a razlog njihovoj pojavi možda bi mogale biti sjene uzrokovane plićom bijelom mrljom (ŠUMANOVAC, 2010).



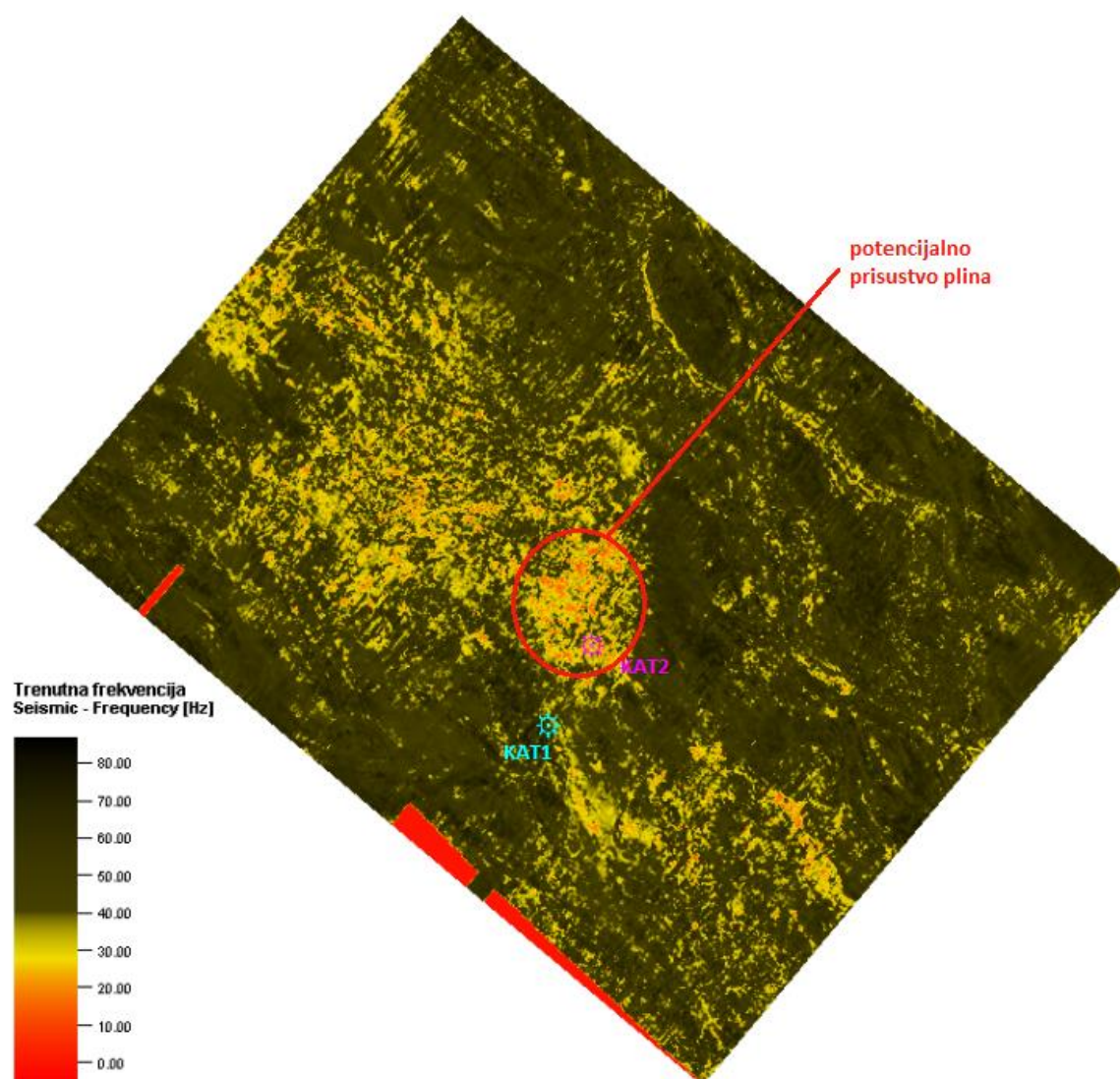
Slika 5.11 Horizontalni presjek trenutne amplitude i trenutne frekvencije za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms



Slika 5.12 Horizontalni presjek varijance i kosinusa trenutne faze za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms



Slika 5.13 Horizontalni presjeci originalne amplitude i kaosa za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms



Slika 5.14 Horizontalni presjek trenutne frekvencije na 1010 ms

Na slici 5.11 prikazani su horizontalni presjeci trenutne amplitude (gornji presjek) i trenutne frekvencije (donji presjek) za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms. Na horizontalnom presjeku trenutne amplitude vrlo se jasno vidi meandrirajuće korito rijeke koje odlikuju visoke vrijednosti trenutne amplitude, što ukazuje na prisutnost bijele mrlje (bijela i crvena boja). Presjek lijepo prikazuje razliku između potencijalno plinonosnih slojeva (duž kanala) i slojeva nezasićenih ugljikovodicima izraženim kontrastom u bojama između niskih i visokih vrijednosti amplitude. Presjek s trenutnom frekvencijom također dobro prikazuje kanal, ali prikaz je nejasniji nego presjek sa korištenim atributom trenutna amplituda. Crvenom i žutom bojom prikazana su potencijalno plinonosna područja.

Slika 5.12 prikazuje horizontalne presjeke varijance (gornji presjek) i trenutne faze (donji presjek) za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms. Varijanca se uz atribut kaosa najčešće koristi upravo za prikaz kanalnih ispuna te pruža možda i najjasniji prikaz kanala i meandara ovog riječnog kanala u cijelom svom toku. Također primjećuju se vrlo niske vrijednosti varijance u kanalu što upućuje na bijelu mrlju odnosno plinonosne sedimente u koritu rijeke obzirom da niske vrijednosti varijance (svijetla boja) često ukazuju na prisustvo ugljikovodika. Na donjem presjeku prikazan je atribut kosinusa trenutne faze za dvostruko vrijeme od 591 ms. Prikaz kanala je, iako vidljiv, poprilično nejasan. Atribut kosinus faze bio je najkorišteniji atribut pri interpretaciji uzdužnih i poprečnih seizmičkih profila, no kod horizontalnih presjeka, nešto slabije oslikava kanal nego prikazi ostalih atributa.

Horizontalni presjeci originalne amplitude (gornji presjek) i kaosa (donji presjek) za dvostruko vrijeme putovanja vala od 591 ms prikazani su na slici 5.13. Horizontalni presjek originalne attribute nudi odličan prikaz riječnog kanala u cijelom svom toku. Ovaj seizmički atribut nije korišten pri analizi uzdužnih i poprečnih profila jer daje prikaze vrlo slične seizmičkim. No kod horizontalnih presjeka, originalnom amplitudom moguće je lakše determinirati bijele mrlje, obzirom da se prisustvo plina očituje u jasnoj inverziji polariteta refleksa. Ovo je seizmički prikaz, gdje se jasno vidi inverzija polariteta refleksa. Inverzija je vidljivo iznad bušotine Katarina-2, gdje je u meandru, vrlo izraženi pozitivni refleks (crvena boja) postao negativan (plava boja). Na horizontalnom presjeku atributa kaosa prikazanog na donjem presjeku, kanal se vidi vrlo jasno. Kaos je kao stratigrafski atribut idealan za prikaz kanalnih ispuna, tako da se na ovom profilu vrlo dobro može pratiti kanal cijelom svojom dužinom.

Seizmički atributi koje najbolje oslikavaju kanal su atribut kaosa, varijanca, originalna amplituda i trenutna amplituda. Atributi kaosa i varijane po definiciji daju odlične prikaze kanalnih ispuna i diskontinuiteta, te su kvalitetni rezultati horizontalnih presjeka ovim atributima bili očekivani. Originalna amplituda moguće prisutnosti ugljikovodika prikazuje naglim inverzijama polariteta, a obzirom da je kanal ispunjen plinonosnim stijenama, ovaj atribut je dao odličan prikaz.

Horizontalni presjek atributa trenutna frekvencija, no ovoga puta oko dvostrukog vremena putovanja vala od 1010 ms prikazan je na slici 5.14. Obzirom na niske vrijednosti frekvencije (crvena boja na profilu), koje često indiciraju pojavu plina, ovo bi također mogao biti horizontalni presjek ležišta PLQ1-D. Pojave plina primjetne su u okolici bušotine Katarina-2.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je u programskom paketu Petrel™ 2014 na temelju trodimenzionalnih seizmičkih podataka interpretirati krovine plinskih ležišta polja Katarina, izraditi strukturne karte za svaki od horizonata, te analizirati horizontalne presjeke prikazane seizmičkim atributima u područjima triju krovina ležišta (PLQ-A, PLQ1-D i PLQ1-C), uz koja su interpretirane i pretpliocenska diskordancija, te krovina formacije Santerno.

U sklopu izrade sintetskih seizmograma bušotine Katarina-1 i Katarina-2 izvedena je izrada seizmograma sa svakim od ponuđenih valića u programu Petrel™ 2014. Najbolje rezultate za bušotinu Katarina-2 dao je ulazni valić nazvan *Poboljšani bijeli valić* (eng. *Extended White*), koji je pokazao odlična podudaranja za refleks PLQ1-A. U bušotini Katarina-1 generalno je dobiveno slabo podudaranje sintetskog seizmograma i površinskih seizmičkih podataka. Izračunato je i šest seizmičkih atributa (trenutna frekvencija, trenutna faza, trenutna amplituda, kosinus trenutne faze, kaos i varijanca) uz pomoć kojih je, uz seizmičke profile, napravljena interpretacija horizonata i rasjeda. Atributi trenutna faza i kosinus trenutne faze pružili su odlične rezultate pri interpretaciji horizonata Pretpliocenska diskordancija, te formacije Santerno. Pri interpretaciji krovina ležišta PLQ1-C i PLQ1-D zamijećene su bijele mrlje ispod kojih se gotovo u pravilu javlja povijanje horizonata zbog smanjena seizmičkih brzina. Na seizmičkim profilima "bijele mrlje se najčešće mogu vidjeti kroz inverziju polariteta refleksa, najkorisniji atribut u tim situacijama bio je trenutna amplituda, koji je izvrsno prikazao pojavu "bijele mrlje" na ležištu PLQ-D. Zone "niskofrekvencijskih sjena" koje su se pojavljivale ispod "bijelih mrlja", te otežavale interpretaciju nižih horizonata, atribut trenutna frekvencija nije uspio dobro prikazati, ali je trenutna amplituda na tim mjestima lijepo prikazivala refleksu u kontinuitetu. Bez primjene atributa, seizmičku interpretaciju horizonata bilo bi vrlo teško izvesti, obzirom da se na nekim dijelovima poprečnih i uzdužnih seizmičkih profila refleksi vrlo slabo vide, te ih je gotovo nemoguće pratiti u kontinuitetu. Pomoću atributa kaosa interpretiran je rasjed.

Za svaki od interpretiranih horizonata izrađene su strukturne karte u vremenskom mjerilu (dvostruko vrijeme putovanja vala do granice). Karte ležišta (PLQ-A, PLQ1-D i PLQ1-C) jasno su prikazale strukturu antiklinale. Svi prethodno spomenuti atributi su realizirani u trodimenzionalne atributne kocke (uz dodani atribut originalna amplituda) kako bi se mogli

prikazati horizontalni presjeci po osi z. Na horizontalnim presjecima zamijećen je kanal u vremenu 591 ms, koji je interpretiran za svaku od atributnih kocki. Najbolji prikaz kanala na horizontalnom presjeku dali su atribut kaosa, varijanca, originalna amplituda i trenutna amplituda. Kod varijance, vrlo se jasno vidi kanal cijelom dužinom toka, te najbolje vide meandri riječnog korita. Kod originalne amplitude u blizini bušotine Katarina-2 jasno se vidi inverzija polariteta refleksa u kanalu, što ukazuje na "bijelu mrlju". Atributi kosinus trenutne faze iako najkorišteniji kod interpretacije uzdužnih i poprečnih profila, kod prikaza horizontalnih presjeka pružio je naslabije prikaze kanala.

7. LITERATURA

1. CAROTENUTO, M., MARIANI, M., POMPADORO, G. (2000): *Croatia offshore – Aiza Laura block, technical evaluation of the exploration potential*, San Donato Milanese, AGIP, 9-37
2. CHIRI, C., CIRONE, C., ZAMBELLI, S. & LOINGER, E. (1997): *Aiza-Laura 3D project, Seismic acquisition feasibility study*, Fond struč. dok. AGIP
3. GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W. & GREGORY, A.R. (1974): *Formation velocity and density – The diagnostics basics for stratigraphical traps*, Geophysics, 39, 770-780
4. MALVIĆ, T., ĐUREKOVIĆ, M., ŠIKONJA, Ž., ČOGELJA Z., ILIJAŠ T., KRULJAC, I. (2011): *Exploration and production activities innorthern Adriatic Sea (Croatia), successful joint venture INA (Croatia) and ENI (Italy)*, Nafta 62, 287-292
5. MALVIĆ, T., VELIĆ J., CVETKOVIĆ, M., VEKIĆ, M., ŠAPINA, M., (2015): *Određivanje novih pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih litostratigrafskih jedinica u hrvatskom dijelu Jadrana*, Geoadria 20/2, 85-108
6. NORBERG, N.C. (2006): *Katarina, Jack up*, INAGIP, Baker Hughes
7. SCHLUMBERGER (2007): *Interpreter's guide to seismis atributes*
8. ŠUMANOVAC F. (2007): *Geofizička istraživanja podzemnih voda*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
9. ŠUMANOVAC, F. (2010): *Razvoj procedura geofizičke interpretacije radi povećanja rezervi u geološki složenim ležištima*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
10. ŠUMANOVAC, F. (2012): *Osnove geofizičkih istraživanja*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

11. TANER, M.T, Koehler, F. & Sheriff, R.E. (1979): *Complex seismic trace analysis*, Geophysics 44, 1041-1061
12. VELIĆ, J. (2007): *Geologija ležišta nafte i plina*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko- naftni fakultet, Zagreb
13. VELIĆ, J., MALVIĆ, T. (2011): *Taložni uvjeti tijekom pliocena i pleistocena u Sjevernom Jadranu te moguća litostratigrafska raščlamba nastalih stijena*, Nafta 82, 33-38
14. VIDAČEK, R. (2005): *Elaborat o rezervama prirodnog plina eksploatacijskog polja Marica, Plinsko polje Katarina*. Fond struč. dok. INA-e.
15. VLAHOVIC, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I., MATIČEC, D. (2005): *Evolution of Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography main events and depositional dynamics*, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 220, 333-360
16. WHITE, R.E. (1991): *Properties of instantaneous seismic attributes*. The Leading Edge 10/7, 26-32